

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PŘÍSTROJOVÉ A ŘÍDÍCÍ TECHNIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

KONTAKTNÍ MĚŘENÍ GEOMETRIE POVRCHŮ

CONTACT SURFACE GEOMETRY MEASUREMENT

AUTOR: PATRIK KOPECKÝ
STUDIJNÍ PROGRAM: STROJÍRENSTVÍ/IAT
VEDOUCÍ PRÁCE: ING. PETR DENK, Ph.D.

PRAHA 2022



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kopecký** Jméno: **Patrik** Osobní číslo: **470002**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Informační a automatizační technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Kontaktní měření geometrie povrchů

Název bakalářské práce anglicky:

Contact surface geometry measurment

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše principů a metod kontaktního měření pomocí 3D odměřovacích systémů
2. Rešerše metod zpracování naměřených dat a komparace s předepsaným modelem povrchu
3. Příprava a provedení kontaktního měření na zvolené součásti
4. Zpracování naměřených dat a jejich vyhodnocení vůči modelu této součásti.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Raja V., Fernandes, K. J. Reverse engineering: an industrial perspective. Springer series in advanced manufacturing, 2008.
[2] E. Savio, L. De Chiffre, R. Schmitt, Metrology of freeform shaped parts, Annals of the CIRP 56 (2007) 810-835.
[3] Robert Roithmeier, Measurement Strategies in Contact Coordinate Metrology: A Publication of Carl-Zeiss-3D-Akademie, Opferkuch, 2007.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Denk, Ph.D., odbor přesné mechaniky a optiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **29.10.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.01.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Petr Denk, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá kontaktním 3D měření geometrie povrchů. Za pomoci kontaktních souřadnicových strojů zvaných CMM. Zabývá se typy těchto strojů, možnými dotyky využitými k měření, kompenzací chyb doteku a nejistotami způsobenými při měření. Cílem této práce je ukázat, že program vytvořený v programovém prostředí Matlab, je možné využít namísto programů již vytvořených pro vyhodnocení dat z měření. V závěru jsou vyhodnocená data z měření porovnána s výkresovou dokumentací součásti měřené součásti.

Klíčová slova

Souřadnicové měřicí stroje, CMM, Sonda, FHSS (frequency hopping spread spektrum), RE (reversní inženýrství), Metrologie

Annotation

This bachelor thesis deals with contact 3D measurement of surface geometry. With the help of contact coordinate machines called CMM. It deals with the types of these machines, possible touches used for measurement. Compensation for touch errors and uncertainties caused by measurements. The aim of this work is to show that a program created in the Matlab programming environment can be used instead of programs already created for the evaluation of measurement data. In the end, the evaluated measurement data are compared with the part drawing and the entered parameters.

Keywords

Coordinate measuring machines, CMM, Probe, FHSS (frequency hopping spread spektrum), RE (reverse engineering), Metrology

Seznam použitých symbolů a zkratk

CMM	Coordinate Measuring machine - souřadnicový měřicí stroj
STL	Stereolithography - stereolitografická síť
TXT	Teletext – Textová informace
2D	Two-dimensional space - dvourozměrný prostor
3D	Three-dimensional space - trojrozměrný prostor
CAD	Computer Aided Design - Počítačem podporovaný návrh
X	X-axes – osa x
Y	Y-axes – osa y
Z	Z-axes – osa z
LED	Light-emitting diode – světelná dioda
ICP	Iterative Closest Point – iterativní nejbližší bod
NURBS	Non-uniform rational basis spline – Nejednotný racionální základní křivka

Obsah

1	ÚVOD	10
2	CMM MĚŘÍCÍ STROJ	12
3	DOTYKOVÉ SONDY	13
3.1	PARAMETRY DOTYKOVÉ SONDY	13
3.2	KINEMATICKÉ SONDY	13
3.3	TENZOMETRICKÉ SONDY	14
3.3.1	SYSTÉM SPÍNACÍHO TYPU	15
3.3.2	SYSTÉM SNÍMACÍHO TYPU.....	15
4	PŘENOS MĚŘENÉHO SIGNÁLU	15
4.1	VODIČEM.....	15
4.2	OPTICKÝ PŘENOS	16
4.3	RÁDIOVÝ PŘENOS	16
4.4	TLAKOVÝ PŘENOS SIGNÁLU	17
5	PARAMETRY DOTYKŮ	17
5.1	TYPY DOTYKŮ	17
5.2	MATERIÁLY DŘÍKU	18
5.3	MATERIÁLY KULIČKY	19
5.4	VOLBA TVARU DOTEKU	19
6	MĚŘÍCÍ SYSTÉMY	21
7	PŘESNOST MĚŘENÍ	23
7.1	ZDROJE CHYB MĚŘENÍ	23
7.2	PŘESNOST SONDY.....	24
7.2.1	<i>Měření sil</i>	24
7.2.2	<i>Měření dráhových charakteristik</i>	24
7.2.3	<i>Necitlivost sondy</i>	25
7.2.4	<i>Stabilita referenčního bodu</i>	25
7.2.5	<i>Celková přesnost snímací hlavy</i>	25
8	CHYBY MĚŘENÍ	25
8.1	SYSTEMATICKÉ CHYBY	25
8.2	NÁHODNÉ CHYBY	26
9	NEJISTOTY MĚŘENÍ	28
9.1	NEJISTOTA TYPU A	28
9.2	NEJISTOTA TYPU B	29
9.3	KOMBINOVANÁ NEJISTOTA.....	29
9.4	ZDROJE NEJISTOT.....	30
9.5	KONKRÉTNÍ ZDROJE NEJISTOT	30
9.5.1	<i>HYSTEREZE</i>	30
9.5.2	<i>FLUKTUACE</i>	30
9.5.3	<i>STÁRNUTÍ</i>	30
9.6	SYSTEMATICKÁ CHYBA	30
10	DOTYK	31
10.1	KOMPENZACE KULIČKY DOTEKU	31
10.2	SMĚR SNÍMÁNÍ	32
11	POSTUP MĚŘENÍ	32
11.1	UPNUTÍ.....	33

11.2	SNÍMÁNÍ BODŮ	33
11.2.1	BOD	33
11.2.2	PŘÍMKA	33
11.2.3	KRUŽNICE	34
11.2.4	ROVINA	36
12	PRÁCE S NAMĚŘENÝMI DATY	37
12.1	ZPRACOVÁNÍ DAT	37
12.2	STANDARDY A FORMÁTY 3D DAT	37
12.3	STANDARDY	38
12.3.1	OPENGL	38
12.3.2	DIRECT3D	38
12.4	FORMÁTY 3D DAT	38
12.4.1	STEP	38
12.4.2	IGES	38
12.4.3	STL	38
12.5	FORMÁTY DAT PRO VÝMĚNU MEZI 2D A 3D	39
12.5.1	DWG	39
12.5.2	DXF	39
13	METODY KOMPARACE 3D DAT S MODELEM POVRCHU	39
13.1	REVERSE ENGINEERING (REVERSNÍ INŽENÝRSTVÍ)	39
13.1.1	FÁZE REVERSNÍHO INŽENÝRSTVÍ	40
13.1.2	BODOVÁ FÁZE	41
13.1.3	POLYGONOVÁ FÁZE	42
13.1.4	KŘIVKOVÁ FÁZE	42
13.1.5	POVRCHOVÁ FÁZE	42
13.2	KOMPARACE MODELU	43
13.2.1	POROVNÁNÍ MRAČEN BODŮ	43
13.2.2	ICP (Iterative Closet Point)	44
14	GEOMETRICKÉ TOLERANCE	44
14.1	TOLERANCE TVARU	45
14.1.1	PŘÍMOST	45
14.1.2	ROVINNOST	45
14.1.3	KRUHOVITOST	46
14.1.4	TOLERNACE VÁLCOVITOSTI	46
14.1.5	TVARU PROFILU	46
14.1.6	TAVRU PLOCHY	47
14.2	TOLERANCE SMĚRU	47
14.2.1	ROVNOBĚŽNOST	47
14.2.2	KOLMOST	48
14.2.3	SKLON	48
14.3	TOLERANCE POLOHY	49
14.3.1	UMÍSTĚNÍ	49
14.3.2	SOUOSOST S SOUSTŘEDNOST	49
14.3.3	SOUMĚRNOST	50
14.4	TOLERNCE HÁZENÍ	50
14.4.1	KRUHOVÉ HÁZENÍ	50
14.4.2	CELKOVÉ HÁZENÍ	51
15	MĚŘENÁ SOUČÁST	54
16	CAD MODEL A VÝKRESY SOUČÁSTI	54
17	MĚŘÍCÍ STROJ	54
18	POSTUP MĚŘENÍ	55

18.1	KALIBRACE SONDY	55
18.2	UPNUTÍ SOUČÁSTI	55
18.3	MĚŘENÍ.....	57
18.4	NAMĚŘENÁ DATA.....	57
19	ZPRACOVÁNÍ DAT.....	57
20	PROGRAM A DIAGRAM.....	58
20.1	FUNKCE FITPLANE A FITCIRCLE	59
20.1.1	<i>FIT PLANE</i>	59
20.1.2	<i>FIT CIRCLE</i>	59
21	VYHODNOCENÍ.....	61
21.1	ROVINNOST PLOCHY.....	61
21.2	KRUHOVITOST VÝVRTU PRO LOŽISKO.....	62
21.3	PRŮMĚR DÍRY	63
21.4	VÁLCOVITOST DÍRY PRO HŘÍDEL	64
21.5	ZÁVITY A JEJICH POLOHA	66
21.6	DÉLKOVÉ ROZMĚRY	67
21.7	SOUOSOST VÝVRTŮ PRO LOŽISKA	67
22	ZÁVĚR.....	69
23	CITOVANÁ LITERATURA	70
24	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	71
25	SEZNAM PŘÍLOH	72

1 ÚVOD

Technologie 3D měření je velkou inovací pro novodobé měření ve strojírenství. Vyvinuto bylo z důvodu potřeby měření tvaru karoserií v automobilovém a leteckém průmyslu. Jenž měl za úkol získat informaci o rozměrech měřené součásti. Proto výhodou těchto strojů je přesné měření v řádech tisícín mikrometrů, v dnešní době je možné zjišťovat povrchové parametry součásti jako je například drsnost. Novější měřící metody jsou schopny změřit součást bezkontaktně, těmto strojům se říká 3D skenery, opět je to měření v kartézském souřadném systému, tak jako stroje kontaktní. Tato technologie je vhodná pro měření skoro všech součástí i materiálů. Při tomto měření je výhoda oproti CMM stroji, kde měřená součást nepodléhá deformaci od měřícího doteku. Nevýhodou je však malá přesnost pohybující se v řádech desítek až stovek mikrometrů. Metoda měření spočívá ve vyslání laserového paprsku a opětovného zachycení jeho odrazu od měřené součásti. Na rozdíl od měření pomocí dotyků je vhodné použití u materiálů, které jsou náchylnější na deformaci při kontaktu měřícího dotyku. Tuto technologii je možné použít na měření součástí z kovů, plastů, keramiky a dalších, Avšak nevhodná je pro materiály, které odráží jen velmi malé spektrum vyzářených paprsků. Také se využívá v mnoha odvětvích, jako jsou strojírenství, automobilový průmysl, zdravotnictví, letecký průmysl, výzkum nebo výroba elektroniky. Jedná se o technologii celkem novou, jelikož měření provádí počítač oproti měření, kde samotné měření prováděl člověk za pomoci posuvného měřidla, mikrometru, metru a dalších měřících nástrojů. Tato technologie také umožňuje měření tvarově složitých součástí, které by bylo velmi obtížné za pomoci jednoduchých měřidel. Jedná se o velmi kvalitní stroje, které získávají naměřená data pomocí sond. Samotné měření je velice rychlé s velkou přesností na několik tisícín. Pomocí měření je možné měřit nedefinované součásti a zjistit tak neznámé parametry nebo měřit součásti, ke kterým máme výkresovou dokumentaci a kontrolovat tak jejich rozměry a tolerance.

V teoretické části se práce zabývá sondami určenými k měření, principy měření, přepočty souřadnic dotykové kuličky na referenční souřadnice stroje a práce s nejistotami měření. V úkolu druhém, pak máme za úkol, připravit výkresy a tolerance měřené součásti. Poté připravit a provést měření na CMM stroji. Odkud získáme mračno bodů, které reprezentují hodnoty v kartézských souřadnicích. Důležitou součástí je následné vyhodnocení změřených dat a jejich porovnání s CAD modelem, respektive zjištění, zda součást odpovídá výkresové dokumentaci.

I. TEORETICKÁ ČÁST

2 CMM MĚŘÍCÍ STROJ

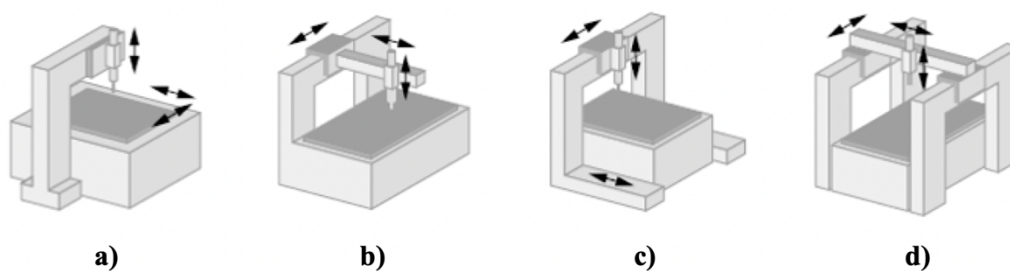
CMM měřicí stoj je sofistikovaná soustava, která se skládá z několika částí. Jednou z částí je příměrná deska, která je doplněná měřícím mechanismem. V mechanismu se nachází měřící dotek, tedy doteková sonda. Je použita pro měření parametrů součástí. Polohu lze identifikovat pomocí optiky nebo číslicových ukazatelů. Následně jdou data odeslána do počítače a zpracována v příslušném softwaru. Existuje několik druhů CMM strojů jako jsou:

- Mostové
- Výložníkové
- Pinolové
- Sloupové, stojanové

Dále se dělí podle hmotnosti měřených obrobků:

- S pohyblivým stolem
- S pevným stolem
- S pevnou deskou v úrovni podlahy

Avšak nejvíce uplatňovaná v praxi je konstrukce mostová. Kde vynikají tuhou konstrukcí a velkým prostorem pro měření. Díky trojrozměrné kapacitě je možné součásti měřit z pěti stran při jedné pozici na měřícím stole. Výložníková konstrukce má menší měřicí prostor, ale umožňuje lepší přístup k měřené součásti. Využívají se pro měření menších a středních rozměrů. Pinolové najdou využití při měření vodorovných otvorů. Sloupové a stojanové jsou nejpřesnější díky jejich pevné konstrukci. [1] [2] [6]



Obrázek 1-Typy souřadnicových měřicích strojů a) stojanový typ, b) výložníkový typ, c) portálový typ, d) mostový typ [6]

Vlastní konstrukce umožňuje pohyb sondy ve třech základních směrech (vodorovně, příčně, svisle). Každý ze strojů má svá délková měřidla. Většinou se používají skleněná nebo keramická pravítka, kde jsou laserově vypáleny jednotlivé dílky délek po (0,1 μm) a bývají ve třech osách. Materiál je volen takový, aby byla co nejmenší tepelná roztažnost pro dosažení požadované přesnosti. Vodorovný, příčný i svislý pohyb pinoly je řízen servomotory a umožněn díky vzduchovým polštářům ve vedení vzduchového ložiska. Existují různé typy ložisek a hlavním rozdílem je distribuce vzduchu do vzduchové mezery. U všech typů je požadován ideálně plochý průběh tlaku vzduchu na dosedací ploše. Servomotory jsou digitálně ovládány se zpětnou vazbou. Vlastní pohyb je distribuován přes třecí převody. [1] [2]

3 DOTYKOVÉ SONDY

Sondy jsou určeny pro zjištění polohy a parametrů měřené součásti. Nejčastěji se pak zjišťují tolerance a rozměry dané součásti. Kontaktní měření je oproti komunálním měřidlům mnohem rychlejší a přesnější. Zároveň dokážou změřit i tvar měřené plochy. Je několik druhů sond, kde dotykové sondy jsou nejčastěji aplikovanými. Pro získání informace o rozměrech je nutný dotyk měřicí hlavy a měřené součásti. V okamžiku, kdy se sonda dotkne měřené součásti, zapisují se polohové souřadnice os X, Y a Z do řídicího systému. Po ukončení měření, jsou nasnímaná data převedena v počítači na potřebné veličiny.

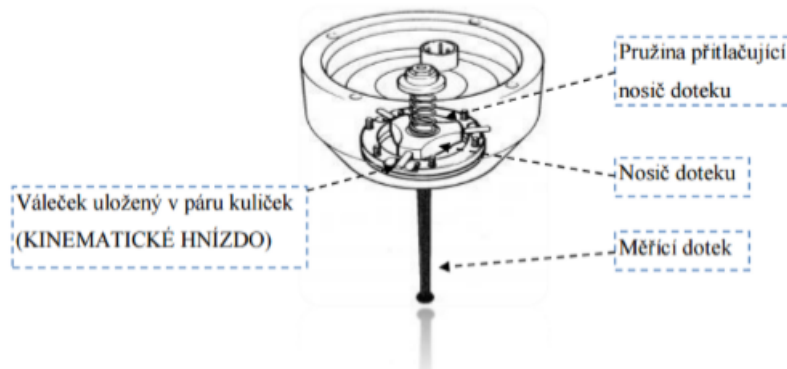
Dotekové sondy se dají rozdělit do dvou různých tříd. První třídou jsou kinematické a druhou pak tenzometrické. Kdy kinematické sondy pracují na principu vychýlení měřicího dotyku a následném spínání pomocí sil od vychýlení měřicího dotyku. Tenzometrické sondy pak pracují na principu snímání pomocí tenzometrů a jejich proměnlivého vnitřního odporu. [16]

3.1 PARAMETRY DOTYKOVÉ SONDY

Na svém konci je sonda opatřena tvrdým materiálem, nejčastěji to bývá syntetický monokrystalický rubín, jenž vykazuje velmi vysokou tvrdost, ale ne vždy je vhodný pro měření. Proto se využívají i jiné materiály jako je korozivzdorná ocel, karbid wolframu, titan a uhlíková vlákna. Celá sonda má specifický tvar. Skládá se z několika částí. Měřicí dotyk, na jehož konci se nachází materiál vhodných pro měření. Měřicí dotyk musí mít zeslabený krček, pokud by došlo ke špatné manipulaci, dojde tak k poškození měřicího dotyku, a ne drahého mechanismu uvnitř sondy. Z ekonomického hlediska je mnohem výhodnější vyměnit samotný měřicí dotyk. [16]

3.2 KINEMATICKÉ SONDY

Pro zaznamenání spínací síly je použito kinematické uložení. Spínací mechanismus se skládá ze tří kinematických prvků pracujících na stejném principu. Jedná se o válec, který je sevřen mezi dvěma kulovými plochami. Po vychýlení mechanismu a sejmutí bodu zajišťuje vracení do výchozí polohy. Důležitou hodnotou ovlivňující přesnost celého měření je zaručenost návratu celého mechanismu do počáteční polohy. [16]



Obrázek 2-mechanismu kinematické sondy [9]



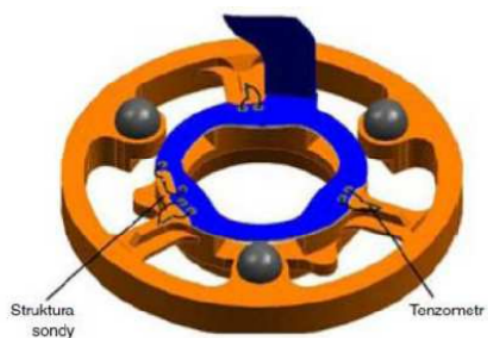
Obrázek 3-Princip měření kinematické sondy [6]

Další důležitý faktor je směr dotyku měřícího dotyku, je to směr, ve kterém působí snímací síla vůči kinematickému mechanismu. Na tento faktor má vliv vzdálenost mezi osou dříku a pivotovacím bodem kinematického mechanismu (bod kolem kterého se mechanismus naklápí při působení spínací síly). Je ovlivněna velikostí ramene, na němž působí spínací síla, tedy i velikost spínací síly. [6]

3.3 TENZOMETRICKÉ SONDY

Síla potřebná k sepnutí je detekována elektronicky za pomoci tenzometrů. Jedná se o čidla, jež jsou schopna zaznamenat mechanickou změnu na povrchu sondy a měnit svůj vnitřní odpor. Když dosáhneme předem nastavené síly jejíž hodnota je přibližně v rozmezí 0,75 – 3 [N], která má působit na tenzometr. Pak se vyšle spínací signál a sonda zaznamená polohu bodu, kde došlo ke kontaktu. Sonda v sobě obsahuje i kinematický mechanismus, který je zde použit jako bezpečnostní pomůcka předcházející poškození sondy, pokud by došlo ke kolizi s měřenou součástí.

Spínací síla potřebná k vyslání spínacího signálu je menší než u sond kinematických. Čímž vzniká větší náchylnost k nechtěnému doteku a sejmutí bodu. Pro filtraci nežádoucích dotyků je zde elektronický obvod. Jeho úkolem je filtrace spínacích sil. Dochází k porovnání sil a vyhodnocení, zda je měřící dotyk v kontaktu se součástí nebo na měřící dotyk působí vnější síly. Filtr pracuje se zpožděním, pokud kontakt trvá po dobu zpoždění, dojde k vyslání spínacího signálu do řídicího systému. [9]



Obrázek 4-Mechanismus tenzorové sondy [9]

3.3.1 SYSTÉM SPÍNACÍHO TYPU

V okamžiku, kdy dojde k fyzickému kontaktu měřícího konce sondy (kuličky) a měřené součásti, dojde k vyslání signálu, následně dojde k okamžitému zastavení pohybu a odečtení souřadnic z polohového systému stroje. Získáme tedy diskrétní souřadnice. [6]

3.3.2 SYSTÉM SNÍMACÍHO TYPU

Z konstrukčního hlediska se jedná o složitější systémy. Využívají se v případech, kdy nemáme výkresovou dokumentaci a je potřeba zjistit neznámé parametry součásti. Měřící hlava přístroje, je v neustálém dotyku s měřenou součástí. Přítlak je do té doby, dokud nedojde k ukončení měření. Lze zde kontrolovat složitější součásti pomocí tzv. dynamického režimu (možnost spojitého měření). [6]

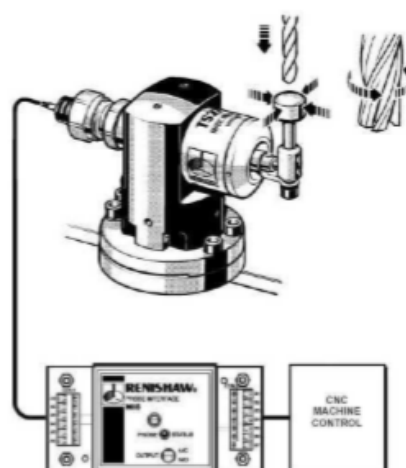
4 PŘENOS MĚŘENÉHO SIGNÁLU

Další možností rozlišení obrobkových sond je, jakým způsobem dojde k přenesení měřeného signálu do systémové části stroje. Mezi nejčastěji využívané metody přenosu signálu řadíme: [16]

- Vodičem
- Optickým přenosem
- Rádiovým přenosem

4.1 VODIČEM

Nejjednodušší přenos měřícího signálu, ze sondy do systému stroje. Vodič je propojen s řídicím systémem stroje a jejich komunikace je vhodná pouze pro nástrojové sondy pevně spojené se stolem. Pro sondy, které jsou vkládány do vřetene stroje, jsou nevhodné, kvůli omezenému pohybu a snížené přesnosti měření. Jelikož ve vřeteni stroje dochází k pohybům a mohlo by dojít k zamotání kabelu do nástroje a následně poškození stroje, nástroje nebo kabelu. [17]

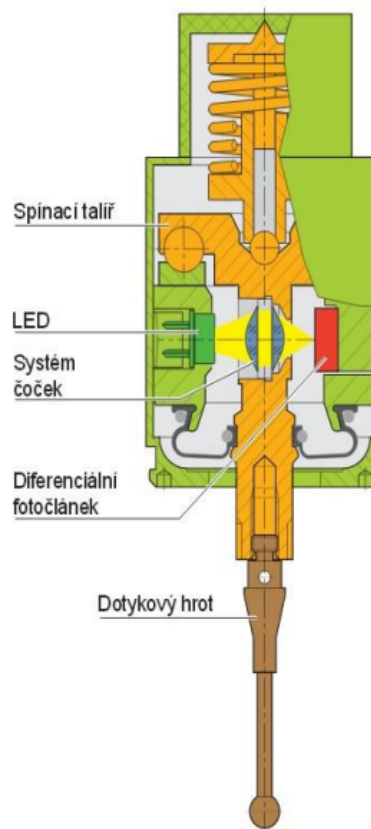


Obrázek 5-Přenos signálu pomocí vodiče [17]

4.2 OPTICKÝ PŘENOS

Ke komunikaci je využito infračervené spektrum světelného záření. Jedná se o velmi spolehlivý přenos, který je zdravotně nezávadný a jeho náchylnost na rušení je minimální. Ke komunikaci dochází pomocí komunikačního modulu, kde se v těle sondy nachází vysílač a v těle stroje přijímač. Komunikaci pro tento typ sondy zajišťuje bezdrátový přenos pomocí světelného záření. Délka dosahu signálu je přibližně 4 cm. Typickou ukázkou je sonda typu TS 440 na obrázku 7, která je konstruována tak, že uvnitř sondy se nachází vzduchová turbína, která pohání vlastní generátor sondy a tím ukládá energii. Sonda je tak schopna pracovat samostatně bez jakéhokoliv zdroje napájení. Díky optickému přenosu dochází k minimálnímu opotřebení přenosové trasy.

LED dioda vyzařuje světelné paprsky do prostoru, které jsou usměrněny čočkami a zachyceny fotočlánkem jako jeden světelný paprsek. Při průběhu měření je hrot ve fyzickém kontaktu s měřenou součástí, dojde tak k vychýlení hrotu a vzniku spínacího signálu. Spínací talíř je uložen na třibodovém ložisku a spojený s dotykovým. [7] [9]



Obrázek 6- Konstrukce sondy třídy 2xx, 44x, 64x [9]

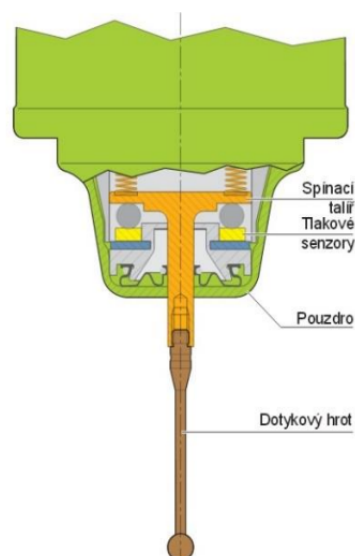
4.3 RÁDIOVÝ PŘENOS

Schopnost přenášet signál ze sondy do stroje, to i v případě, pokud se sonda nachází za součástí a nemá tak přímý kontakt s komunikačním modulem. Délka dosah signálu je na přibližně 15 cm, třikrát delší dosah než u optické sondy.

Za zmínku stojí technologie FHSS (frequency hopping spread spektrum – roztržité spektrum s přepínáním kmitočtu). Sonda spolupracuje se standartním modulem rádiového systému pro obráběcí stroje a používá volné frekvenční pásmo 2,4 GHz. Díky technologii FHSS se v případě, že dochází k rušení signálu, dokáže sonda sama přeladit na nejbližší volný kanál a úspěšně dokončit komunikaci. [17]

4.4 TLAKOVÝ PŘENOS SIGNÁLU

V sondě je jiné uložení spínacího talíře než u sondy optické. Obsahuje tlakové senzory. Spínací impuls je vytvářen silou, kterou působí spínací talíř na tlakové senzory. Působící síly jsou vyhodnoceny elektronicky. Přenos dat ze sondy do PC probíhá pomocí infračerveného záření. Při kontaktu se vychýlí hrot od své stabilní polohy, dojde tak ke změně poměru tlaků na spínacím talíři. Tlakové senzory zjistí změnu a tím dojde k vygenerování spínacího signálu. Hodnoty přitlaku na měřený povrch se pohybují v rozmezí 0–8 N v axiální ose, v ose radiální je to pak rozmezí 0–1 N. [7] [9]



Obrázek 7- Sonda třídy TS740 [9]

5 PARAMETRY DOTYKŮ

Dotek je součástí měřicího systému, který zprostředkovává kontakt mezi součástí a sondou a způsobuje sepnutí v mechanismu sondy, který je přitom generován, umožňuje zaznamenávání souřadnic sejmutého bodu. Měřený prvek určuje typ a velikost použitého doteku. Nejdůležitějšími vlastnostmi však zůstávají maximální tuhost doteku a dokonalá kulovitost hrotu.

5.1 TYPY DOTYKŮ

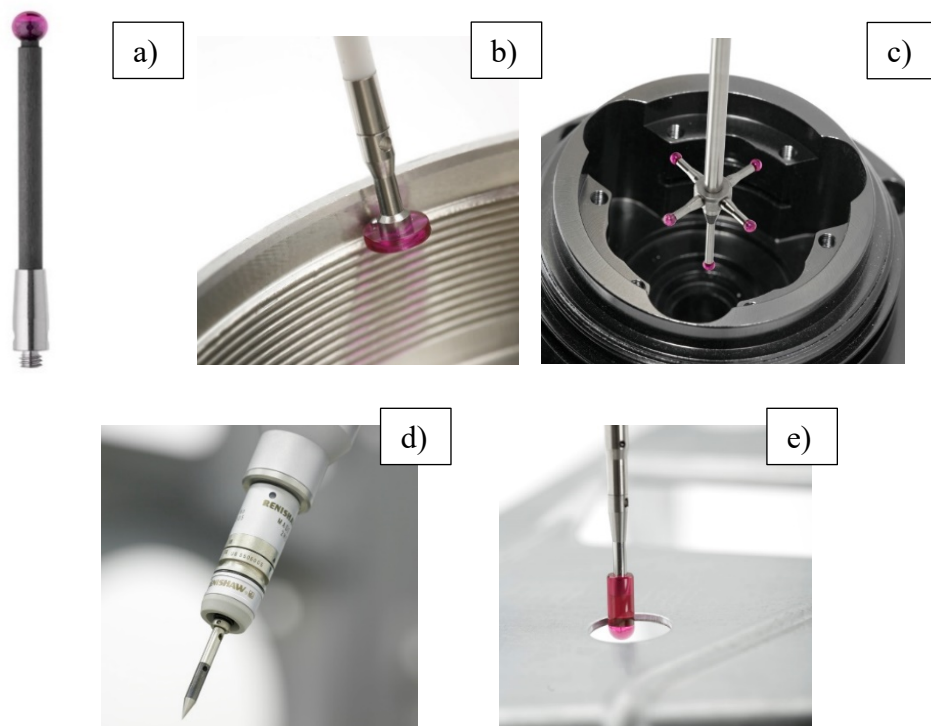
Přímý dotyk na obrázku 10 a, nejjednodušší a nejčastěji používaný typ. Vhodný pro většinu snímacích aplikací. Držáky, dřívky i kuličky mohou být vyrobeny z různých materiálů. Kulička je nejčastěji vyrobena ze syntetického rubínu.

Diskový dotyk na obrázku 10 b, používají se pro měření zápchů a drážek v dířích. Tam kde nejde použít hvězdicový dotyk. Jedná se o tenký pás velké a velmi přesné koule. Umožňuje úhlové nastavení pro správný kontakt disku a součásti. Dotyky mohou být vyrobeny z oceli, keramiky a rubínu.

Hvězdicový dotyk na obrázku 10 c, konfigurace s více dotyky uchycenými na jednom pevném středovém dílci. Jejich využití je pro měření složitých povrchů a děr. Umožňují měření několika prvků dílce bez potřeby výměny. Na středovém dílci se nachází až 5 dílců, které je možno využít.

Válcový dotyk na obrázku 10 d, využívá se pro měření děr v plechu, lisovaných dílců a tenkých součástích, u kterých nejde zajistit řádný kontakt s kuličkou dotyku. Lze jej také využít pro měření závitů a lokalizaci středů závitových děr.

Dotyk s hrotem na obrázku 10 e, Vyvinut pro měření tvarů závitů, definovaných bodů a rysek. Lokalizace velmi malých děr. [6] [11] [16]



Obrázek 8- a) Přímý dotyk, b) Diskový dotyk, c) hvězdicový dotyk, d) Dotyk s hrotem, e) Válcový dotyk [11]

5.2 MATERIÁLY DŘÍKU

Ocel, nejčastěji používaná nemagnetická korozivzdorná ocel. Důležitý je rozměr kuličky, případně hrotu, pro zajištění optimální tuhosti, hmotnosti a adekvátního průřezu, aniž by byla snížena tuhost. [14]

Keramika, tuhost je srovnatelná s ocelí. Oproti karbidu wolframu je výrazně lehčí. Dokáže sondu ochránit v případě havárie, kdy dojde k roztržení kuličky.

Karbid Wolframu, U tohoto materiálu je zajištěna optimální tuhost a malý průměr dříku.

Uhlíková vlákna, jsou o dvacet procent lehčí než karbid wolframu. Jsou tedy vhodné pro dlouhé dotyky. Velkou výhodou je tepelná stabilita a dobré tlumení vibrací.

Hliník a Titan, hliník je díky své lehkosti často využíván na výrobu prodloužení, kvůli jeho vysoké tepelné roztažnosti je vhodný pouze do klimatizovaných prostředí. Titan je oproti hliníku tepelně stálý a má dobrou ohybovou tuhost, je velmi lehký proto se využívá pro dlouhá prodloužení. [11] [16] [18]

5.3 MATERIÁLY KULIČKY

Rubín, je použit v převážné většině měřících aplikací, kromě skenování dílců z hliníku a litiny. Disponuje vysokou tvrdostí, vynikající pevností v tlaku, velmi dobrá odolnost proti mechanickému poškození. Dosahuje tvrdosti až 1800 HV. Používá se uměle vytvořený rubín, takzvaný syntetický rubín, který je z složen z 99 % oxidu hlinitého a posléze tepelnou úpravou při 2000 °C se vytvářejí krystaly.

Nitrid Křemíku, je určen jen pro hliníkové povrchy. Má vysokou tvrdost, ale nízkou odolnost proti opotřebení otěrem při kontaktu s ocelovým povrchem a hladký povrch leštěním.

Zirkonium, je vhodný pro agresivní aplikace litinových součástí. Má vysokou pevnost, tvrdost a odolnost proti opotřebení. [11] [16] [18]



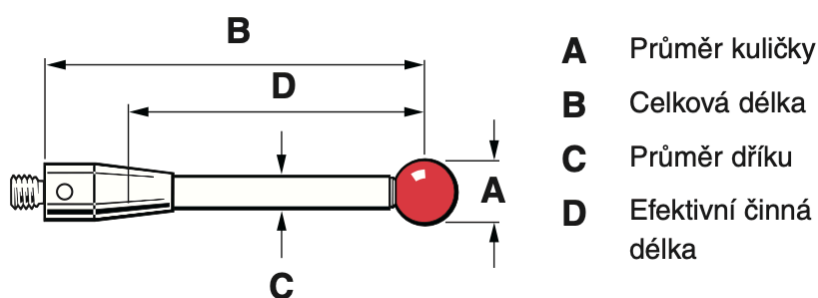
Obrázek 9- Materiály kuliček (rubín, nitrid křemíku, zirkonium) [11]

Typ doteku	Materiál	Odchylka kulovitosti [μm]	Čistota [%]	Tvrdost [HV]	Pevnost v tlaku [MPa]
Rubínové kuličky	Monokrystalický syntetický rubín	0,13	99,9	1800	2100
Kuličky z nitridu křemíku	Nitrid křemíku	0,13	90	1600	2000
Duté keramické koule na bázi oxidu hlinitého	Sintrovaný oxid zirkoničitý	0,13	90-85	1200	2000

Tabulka 1- Parametry kuliček doteku [11]

5.4 VOLBA TVARU DOTEKU

Dokonalý tvar a tuhost jsou důležitou vlastností. Při výběru samotného měřícího dotyku bychom měli zohlednit několik parametrů. K určení optimálního doteku využijeme čtyř parametrů, kterými jsou průměr kuličky, celková délka, průměr dříku, efektivní činná délka, pro volbu optimálního doteku. Podrobněji jsou tyto parametry znázorněny v obrázku (rozměry dotyku).



Obrázek 10- Rozměry dotyku [6]

Volit krátké dotyky, kratší dotyk zvyšuje tuhost a tím se zvyšuje přesnost měření. U dlouhého doteku může dojít k prohnutí sondy v oblasti elastické deformace. Výsledkem je nepřesné měření.

Velikost kuličky, ovlivňuje velikost vůle stopky a zmenšuje vliv kvality povrchu součásti. Čím větší je mezera mezi kuličkou a dříkem dotyku, poté je malá možnost chybných sepnutí způsobených kolizí dříku s dílcem.

Málo spojů, v každém spoji se nachází potenciální bod ohybu nebo vychýlení, který může zásadně ovlivnit přesnost měření.

Měření vnitřních prvků, speciální tip měření, je dobré využít hvězdicových dotyků pro lepší kvalitu získaných dat. Hvězdicový dotyk na sobě nese až 5 hrotů, lze jej využít i pro měření drážek.

Tvarová úchylka kuličky, většina měřících dotyků je zakončena kuličkou. Nejčastěji bývá vyrobena ze syntetického rubínu. Tvarová úchylka může ovlivnit přesnost měření až o 10 %. Rubínové kuličky se vyrábí s určitou mírou přesnosti, který se vztahuje k maximální odchylce povrchu kuličky od ideální koule. Kuličky jsou rozděleny do 45 tříd přesnosti. [6] [11] [16]

třída přesnosti	odchylka [μm]	kruhovitost [μm]
20	$\pm 0,50$	0,50
16	$\pm 0,40$	0,40
10	$\pm 0,25$	0,25
5	$\pm 0,13$	0,13
3	$\pm 0,08$	0,08

Tabulka 2- Třídy přesnosti kuliček [6]

Příklad:

Obvyklá chyba měření dle normy ISO 10360-2 (MPE_P) dosažená při použití doteku s kuličkou stupně přesnosti Grade 5:

$$MPE_P = 1,70 \mu\text{m}$$

Tato hodnota je stanovena měřením 25 jednotlivých bodů, které jsou hodnoceny jako 25 samostatných poloměrů. Rozsah odchylky poloměrů je hodnota MPE_P . Kulovitost kuličky doteku k tomu přímo přispívá a nahrazením kuličky stupně 5 kuličkou stupně 10 se zvedne tato hodnota o $0,12 \mu\text{m}$, což v našem případě změní chybu sondy o 7 %:

$$MPE_P = 1,82 \mu\text{m}$$

Je třeba zmínit, že tvarová úchylka kuličky doteku rovněž ovlivňuje MPE_{THP} , která je určena pro vyhodnocení výkonu skenovacích sond.

Poznámky:

Stupeň přesnosti Grade 5 = tvarová úchylka $0,13 \mu\text{m}$

Stupeň přesnosti Grade 10 = tvarová úchylka $0,25 \mu\text{m}$

Tuhost dotyku, čím větší délka dotyku, tím větší nepřesnost měření. Příčinou je proměnlivá spínací síla sondy. Síla tedy elasticky deformuje dotyk. Dojde k malému vychýlení sondy směrem k měřené součásti. Tuhost zásadně ovlivňují spoje, proto bychom měli volit vždy minimální počet.

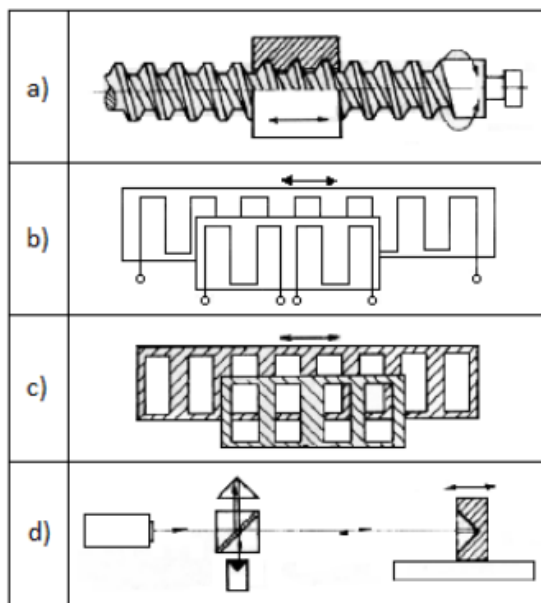
Teplotní stabilita, s měnící se teplotou dochází k ovlivnění přesnosti měření. Tomuto jevu lze zabránit volbou vhodného materiálu. Teplotní roztažnost je přímo úměrná délce, proto je vhodné volit materiály s nízkou teplotní roztažností.

Materiál kuličky dotyku, velmi důležitý parametr, který zásadně ovlivňuje opotřebení. Při spínacím měření nedochází k téměř žádnému opotřebení. Naproti tomu snímací měření je pro kuličku velmi náročné, jelikož dochází k neustálému kontaktu se součásti, tak i k opotřebení otěrem. [6] [11] [16]

6 MĚŘÍCÍ SYSTÉMY

Základem celého měření je měřicí systém, odkud posléze získáme souřadnice z nasnímaných bodů a jsou uvedeny v kartézských souřadnicích. Proto abychom získali potřebné body musíme součást změřit v různých bodech. Je tedy potřebné pohybovat buď sondou nebo samotnou součástí. K určení polohy je určeno několik měřících systémů. Pro měření se velmi často využívají tyto čtyři délkové měřicí systémy. [6]

- Závitový hřídel s úhlovým převodníkem
- Lineární inductosyn
- Inkrementální délková stupnice
- Laserinterferometr



Obrázek 11- Měřicí systémy a) závitový hřídel b) induktošyn c) inkrementální délková stupnice d) laserinterferometr [6]

Závitový hřídel s úhlovým převodníkem, vyrábí se až do délky 1,2 m. Mají velmi malé stoupání. Abychom zajistili jejich tepelnou stabilitu, jsou uloženy v olejové lázni. Jejich nevýhodou je chyba reverzibility, která je způsobená vůlí mezi šroubem a maticí. Úhlový převodník má rozlišitelnost 1“.

Induktošyn, jedná se o zařízení založené na bázi fázového odměřování. Induktošyn může být lineární nebo rotační.

Lineární induktošyn, měřítko, které je zhotoveno formou vodivého plošného spoje na nevodivé fólii, s krokem na izolantu zhotoveného ze skla, keramiky a nemagnetizační kov s izolační vrstvou. Koeficient tepelné roztažnosti musí být stejný jako má materiál stroje. Plošný spoj má tvar pravoúhlého meandru a je napájený střídavým proudem. Délka jedné vlny cívky je 2 mm. Proti měřítku je, vzdálenost cca 0,1 mm je umístěn jezdec, na kterém jsou způsobem plošného spoje vytvořeny dvě smyčky obdenného cívky se stoupáním 2 mm. Jejich vzájemná vzdálenost je 0,5 mm. [15]

Na smyčkách se indukují napětí, která jsou vůči sobě posunutá o 90°. Při pohybu jezdce vznikne přibližně sinusový průběh napětí, jehož interpolací vychází krok na 1 μm a je rozlišen smysl pohybu.

Inkrementální délková stupnice, nejjednodušší odměřovací systém. Rozlišitelnost je 1 μm, základní stupnice je umístěna na skleněném nebo kovovém podkladu a střídavě propouští světlo. Střídající pole propouštějící a odrážející světlo s poli nepropouštějící a neodrážející světlo. Jezdec má 4 pole, která propouštějí světlo. Dvě pole jsou posunuta o čtvrtinu rozteče. Vzdálenost rysek je 0,01 ÷ 0,04 mm. Velmi snadná kalibrace.

Laserinterferometr, používá se jen zřídka, velmi drahé a citlivé zařízení. Pracuje na principu světelného paprsku, na kterém se jeho rozložením a opětovným složením vznikne interference. [6]

7 PŘESNOST MĚŘENÍ

Je vlastnost souřadnicového měřicího stroje, která charakterizuje jeho schopnost udávat údaje shodné se skutečnou hodnotou měřené veličiny. Vyjadřuje kvalitativně stupeň přiblížení naměřených hodnot hodnotám skutečným. Přesnost měření ovlivňuje několik faktorů.

7.1 ZDROJE CHYB MĚŘENÍ

Souřadný systém:

- deformace stroje
- chyby přímosti
- chyby kolmosti
- tření
- vůle

Snímací systém:

- linearita
- hystereze
- životnost
- stabilita nulového bodu

Měřicí dotek:

- průhyb
- chyba tvaru
- Opotřebení

Měřené součásti:

- povrch
- hmotnost

Odměřovací systém:

- chyba měřítka
- chyba justáže

Řízení:

- chyba digitalizace

Podmínky okolí:

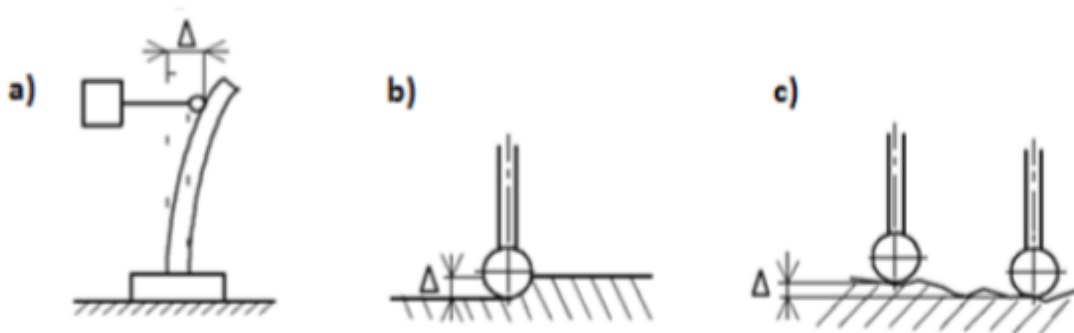
- chvění
- kolísání teploty
- Způsob upnutí součásti

K nejvíce ovlivňujícím faktorům přesnosti měření jsou především vliv roztažnosti materiálu měřené součásti a vliv atmosférických podmínek. Kdy dojde ke změně objemu jak součásti, tak sondy. Jelikož materiály podléhají teplotní roztažnosti. Proto je zapotřebí, při měření zachovávat konstantní teplotu, proto se měření provádí v klimatizovaných místnostech. [13]

- Teplota materiálu $\Delta\theta = 0,1 \text{ K}$
- Teplota vzduchu $\Delta T = 1,11 \text{ K}$
- Barometrický tlak $\Delta p = 3,33 \text{ hPa}$
- Relativní vlhkost $\Delta\Phi = 10 \%$

7.2 PŘESNOST SONDY

Konstrukční provedení sondy má také vliv na přesnost měření. Příčinou těchto chyb jsou deformace poddajných součástí, poddajnost povrchu součásti a tvarová úchylka kontrolovaného povrchu. [17]



Obrázek 12- Chyby vzniklé při měření [17]

- a) Deformace poddajných součástí
- b) Poddajnost povrchu součásti
- c) Tvarová úchylka kontrolovaného povrchu

Snímací hlavou elektro kontaktního odměřování se rozumí výměnné snímací zařízení, upínané do pinoly souřadnicového měřicího stroje, včetně napájecí a vyhodnocovací elektronické části. Hlava nemá vlastní měřicí systém a výstupní signál je pouze změna stavu.

7.2.1 Měření sil

- a) Osová síla F_0 působící ve směru osy hlavy
- b) Měřicí síla F_m působící kolmo k ose

7.2.2 Měření dráhových charakteristik

Všechny charakteristiky přesnosti jsou zjišťovány ve směru dráhy snímacího elementu.

7.2.3 Necitlivost sondy

Je to dráha, kterou musí sondy urazit od okamžiku prvního dotyku, po okamžik generování signálu snímací hlavy.

7.2.4 Stabilita referenčního bodu

Jedná se o polohu středu snímacího elementu vzhledem k pevné části snímací hlavy v klidovém stavu. Stabilita referenčního bodu je rozdíl poloh středu snímacího elementu v klidovém stavu po předchozím vychýlení snímacího dotyku a jeho samovolném vrácení do klidového stavu. [17]

7.2.5 Celková přesnost snímací hlavy

Je popsána nejistotou snímání, jedná se o bezrozměrnou veličinu. Ve vztahu se objevuje parametr s , jenž je výběrová směrodatná odchylka (nemůžeme zaměňovat se směrodatnou odchylkou σ), následně je celková přesnost snímací hlavy dána vztahem:

$$N_T = \Delta k \pm \sqrt{s_s + s_n + s_r}$$

(1)

kde: Δk – odchylka kruhovitosti snímacího elementu
 s_s – střední směrodatná odchylka stability referenčního bodu
 s_n – střední směrodatná odchylka normálového vektoru doteku
 s_r – střední směrodatná odchylka poloměru kuličky

8 CHYBY MĚŘENÍ

Souřadnicový měřicí stroj není schopen měřit skutečné hodnoty, ale každé měření je zatíženo chybou. Naměřená hodnota je tedy přibližnou hodnotou naměřené veličiny. Pokud se zaměříme na chyby, tak nás nejvíce budou zajímat systematické, náhodné chyby, nejistoty měření, teplotní roztažnost, deformace, měřicí sonda a vliv obsluhy. Způsobeny jsou použitím nevhodné nebo méně vhodné měřicí metody, nepřesným měřidlem či měřicím přístrojem, případně osobou pozorovatele. Systematičnost pak lze odhalit přesnějším měřením. [19]

8.1 SYSTEMATICKÉ CHYBY

Systematické chyby zkreslují výsledek pravidelným způsobem. Díky jejich pravidelnosti s nimi počítáme a dokážeme je vyloučit z výsledku korekcí, i když by samotné měření bylo provedeno jen jednou. [19]

8.2 NÁHODNÉ CHYBY

Náhodné chyby jsou dílem náhody. Nelze zjistit jedním měřením. Tyto chyby nemůžeme nijak ovlivnit. Na okolnostech měření závisí, jak se ke skutečné hodnotě veličiny přiblížíme. Nekontrolovatelné vlivy, které se při opakování měření mění náhodně a nezávisle na vlivech kontrolovaných, jsou příčinou vzniku náhodné chyby. Výsledkem měření je hodnota veličiny x_i , která se od skutečné hodnoty x_0 odlišuje. Jejich rozdíl je absolutní chyba měření ε_i . [19]

$$\varepsilon_i = x_i - x_0 \quad (2)$$

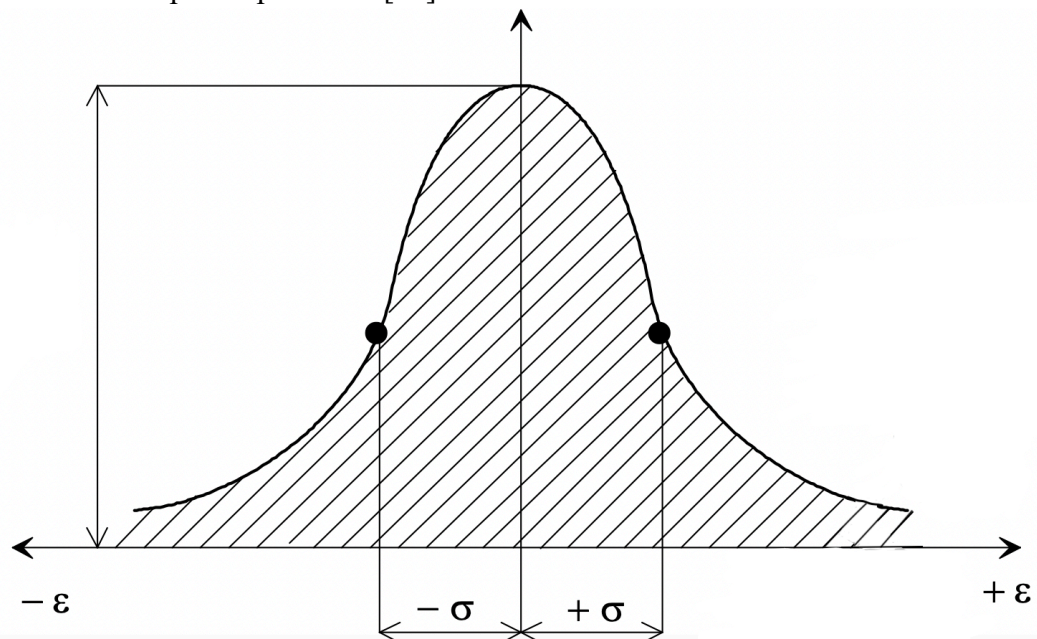
Chybu ε_i nemůžeme nikdy stanovit, můžeme ji pouze odhadnout. Tato chyba se nazývá absolutní chyba. Relativní chyba je pak dána vztahem:

$$\varepsilon_{r,i} = \frac{x_i}{x_0} \quad (3)$$

Jedná se o bezrozměrnou veličinu a často se udává v %.

V případě velkého počtu měření $n \rightarrow \infty$ bude křivka hladká a rozdělení naměřených hodnot dokonale symetrické. Skutečná hodnota x_0 odpovídá maximu křivky. Toto Gaussovo rozdělení vychází za předpokladu, že:

- výsledná chyba každého měření je výsledkem velkého počtu velmi malých, navzájem nezávislých chyb.
- kladné i záporné odchylky od skutečné hodnoty jsou stejně pravděpodobné. [19]



Graf 1- Gaussova křivka [19]

Funkce křivky je vyjádřena rovnicí:

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-X}{\sigma} \right)^2} \quad (4)$$

Kde: ε – skutečná chyba
 σ – směrodatná odchylka
 X – skutečná hodnota
 x – naměřená hodnota

V souřadnicích $+\sigma, -\sigma$ jsou inflexní body. Parametr je směrodatná odchylka. Čtverec směrodatné odchylky se nazývá rozptyl. V uvedené rovnici se v exponentu vyskytuje pravá hodnota naměřené veličiny, kterou můžeme vyjádřit pomocí odchylek. Při matematickém zpracování a úpravách vycházíme z předpokladu, že součet odchylek ve skupině měření je roven nule. Pak platí:

$$X = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

Kde: n – počet měření
 x_i – hodnoty naměřených veličin ($i=1, 2, \dots, n$)

$$v_i = (x_i - \bar{x}) = x_i - \left(X + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \right) = (\varepsilon_i + X) - X - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i = \varepsilon_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (6)$$

Součet čtverců odchylek:

$$v_i^2 = \left(\varepsilon_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \right)^2 \quad (7)$$

Vyjádříme si součet čtverců odchylek:

$$\sum_{i=1}^n v_i^2 = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \cdot \frac{n-1}{n} \quad (8)$$

Další úpravou dostaneme:

$$n \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = (n-1) \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad (9)$$

$$\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 - s^2 \quad (10)$$

Dále je potřeba určit míru rozptylu v základním souboru. Rozptyl hodnot výběrového souboru charakterizuje výběrová směrodatná odchylka s jednoho měření. A je dána rovnicí: [19]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (11)$$

Kde: s – výběrová směrodatná odchylka
 v_i – odchylka

9 NEJISTOTY MĚŘENÍ

9.1 NEJISTOTA TYPU A

Mezi složky stanovené na základě statického zpracování opakovaných měření. Složky nejistoty jsou charakterizovány odhady rozptylů výběrových směrodatných odchylek stanovených z opakovaných měření. Nejistota se v tomto případě se získá jako směrodatná odchylka výběrového průměru: [19]

$$u_A = s = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

Kde výběrový průměr \bar{x} je:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (13)$$

Kde: u_A – nejistota A
 s – výběrová směrodatná odchylka
 x – výběrový průměr

9.2 NEJISTOTA TYPU B

Jedná se o složky stanovené jiným způsobem než statickým zpracováním opakovaných měření. Složky nejistoty tohoto typu jsou stanoveny z funkce hustoty pravděpodobnosti přisouzené měřené veličině na základě zkušenosti a dostupných informací.

- Vytipováním možných zdrojů nejistot
- Určení standardní nejistoty každého zdroje
- Posouzení možnosti korelací mezi jednotlivými zdroji nejistot a v kladném případě odhad hodnoty hodnot korelačních koeficientů $r_{zj,k}$ z intervalu $< -1; +1 >$
- Sloučení jednotlivých nejistot do výsledné standardní nejistoty [19]

Získáme tedy vztah pro nejistotu typu B:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{zj}^2} \quad (14)$$

Kde: u_B – nejistota typu B
 u_z – standardní nejistoty zdrojů

9.3 KOMBINOVANÁ NEJISTOTA

V praxi si jen zřídka postačíme s jedním nebo druhým typem nejistoty samostatně. Pak je zapotřebí stanovit výsledný efekt kombinovaných nejistot měření obou typů, A i B. Výsledná kombinovaná nejistota se potom stanoví podle zákona šíření nejistot. Sloučení se provede podle vztahu: [19]

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (15)$$

kde: u_A – nejistota typu A
 u_B – nejistota typu B
 u_C – kombinovaná nejistota

9.4 ZDROJE NEJISTOT

Jako zdroje nejistot lze označit veškeré jevy, které nějakým způsobem mohou ovlivnit neurčitost jednoznačného stanovení výsledku měření a tím vzdalují naměřenou hodnotu od hodnoty skutečné.

- nevhodný výběr přístroje
- nevhodný postup měření
- neznámé nebo nekompenzované vlivy prostředí
- subjektivní vlivy obsluhy
- nepřesnost etalonů a referenčních materiálů

9.5 KONKRÉTNÍ ZDROJE NEJISTOT

9.5.1 HYSTEREZE

Jedná se o jev, který se dostaví, pokud dojde k ohřátí snímače na vyšší teplotu, než je hodnota počáteční a poté opětovné ochlazení na počáteční hodnotu. Vznikne tak rozdíl mezi měřením před ohřátím a po ohřátí. Velikost hystereze je závislá na rychlosti ochlazování a materiálu teplotního čidla. [19]

9.5.2 FLUKTUACE

Je to změna odporů zapříčiněná chvěním, nárazy, teplotními šoky nebo změnou polohy. Projevuje se nepravidelnými změnami odporu, jehož nová hodnota se po určité době stává konstantní. K jejímu odstranění je potřeba vyšší teplota. [19]

9.5.3 STÁRNUTÍ

Souhrn nevratných změn snímače, způsobených chemického složení platiny, jejím odpařováním a změnou izolačního odporu. [19] [10]

9.6 SYSTEMATICKÁ CHYBA

Chyba se vyskytuje při měření délkových rozměrů na základě souřadného systému. Dochází k ní při nedokonalém zaměření prvků, kdy je vzdálenost odečítána pod nesprávným úhlem. Pro určení chyby jsou potřebné tyto vztahy:

$$\cos \alpha = \frac{L}{L_m} \quad (16)$$

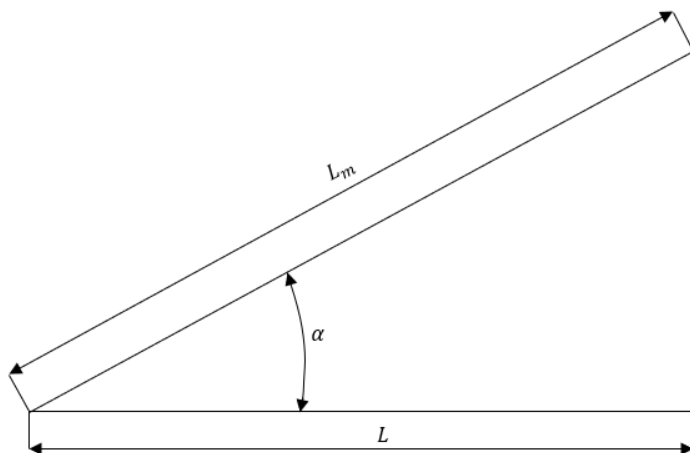
$$L = L_m \cdot \cos \alpha \quad (17)$$

$$L_m - L = \Delta \quad (18)$$

$$\Delta = L_m - (L_m \cdot \cos \alpha) \quad (19)$$

$$\Delta = L_m \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (20)$$

Kde: L – Skutečná vzdálenost
 L_m – Měřená vzdálenost
 α – Úhel vychýlení
 Δ – Kosinová chyba



Obrázek 13- Kosinová chyba

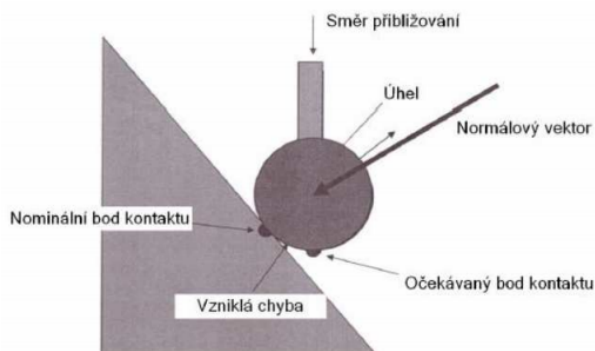
10 DOTYK

10.1 KOMPENZACE KULIČKY DOTEKU

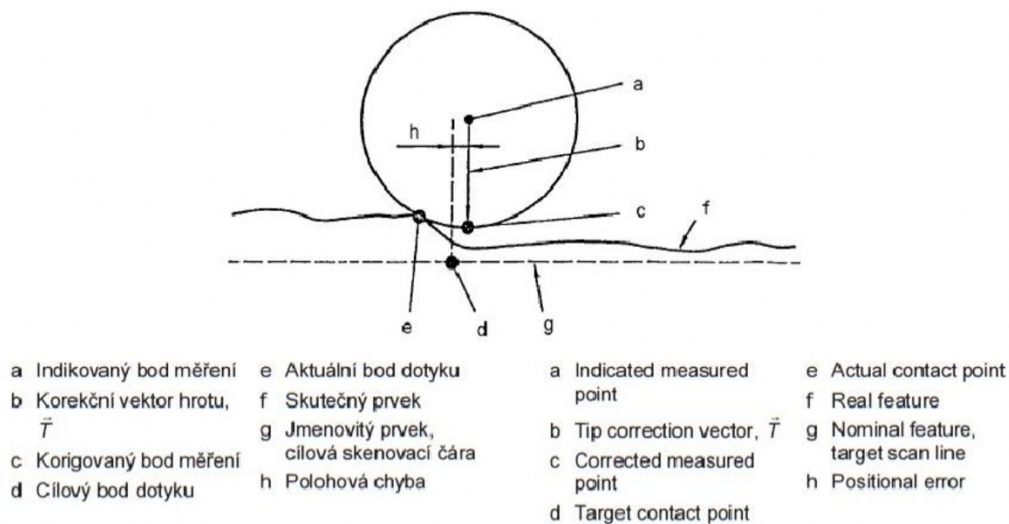
Jedná se o kompenzaci doteku, která je zapnuta v softwaru, kdy při měření prvků, program automaticky počítá s průměrem kuličky. Snímaný bod se pak vypočítává k jejímu povrchu. Pokud je kompenzace vypnuta, vztahují se měřené prvky ke středu kuličky. Využívá se jen velmi málo, pouze pro měření složitých křivek. [3]

10.2 SMĚR SNÍMÁNÍ

Kompensace doteku se získá pomocí směru, odkud je přijížďeno k měřenému bodu. Příjezd by měl být stejný, jako je orientace normálového vektoru, pro co nejpřesnější měření. Přesnost je dost závislá na směru přijetí k povrchu součásti. Vzniká nám tedy kosinová chyba. [3]



Obrázek 14- Kontakt sondy [3]



Obrázek 15- Pojmenování bodů dotyku [3]

11 POSTUP MĚŘENÍ

Nejdříve je zapotřebí sestavit plán měření, ve kterém je zahrnuta dokumentace, způsob upnutí. V plánu je obsažena tzv. strategie měření, ze které musí být jasné jaké jsou požadavky na přesnost měření a hledá se tedy optimální postup k jejich dosažení. Při sestavování průběhu měření musí být dodrženy tyto zásady:

- Upnutí obrobku stabilním způsobem
- Měřicí základny by měli korespondovat s konstrukčními základnami
- Pokud je to možné provádět slučování měřících operací
- Upnutí obrobku tak, aby se dal proměřit při jednom ustanovení, a v jednom souřadnicovém systému

- Volby minimálního počtu doteků
- Volba měřících bodů tak, aby postup byl co nejkratší
- Snímací body mají být rovnoměrně rozloženy na měřeném geometrickém prvku
- Počet snímaných bodů volit o 2 až 3 větší, než vyžaduje geometrická definice
- Směr pohybu snímače před dotykem by měl souhlasit se směrem některé osy
- Kruhové a kulové plochy je nutné snímat párovými dvojicemi, tj diagonálně
- Při statické interpretaci výsledku měření vyhodnotit mračno bodů
- Vyhodnotit dosaženou nejistotu měření a porovnat ji s její požadovanou hodnotou [16]

11.1 UPNUTÍ

Upnutí měřeného modelu lze provést několika způsoby. Důležité je, aby součást nepřekážela v trase měřící sondě. Většina CMM strojů má stůl vyrobený z granitu nebo litiny. Jako upínky se využívají stejné prvky, které se využívají při obrábění (sklíčidlo, svěrák). Často se však využívá upnutí pomocí magnetu nebo podtlaku. U velkých a těžkých dílů stačí položení součásti na stůl stroje. [17]

11.2 SNÍMÁNÍ BODŮ

11.2.1 BOD

Je potřebné při měření zajistit správný směr měření. Ručně změřený bod určuje polohu pouze v jedné ose, to v ose směru vektoru příjezdu k povrchu, protože v tomto směru je vypočítávána kompenzace doteku. [11] [17]

11.2.2 PŘÍMKA

Přímku je možné zkonstruovat pomocí dvou bodů měření. Je to tedy prvek, který pro správné vyhodnocení vyžaduje vhodný výběr pracovní roviny, do které se měřené body přímky promítnou. Pokud máme bod A, kterým prochází přímka p , a směrový vektor \vec{u} , pak platí, že každý bod X této přímky lze vyjádřit jako: [11] [17] [20]

$$X_n = A_n + t \cdot \vec{u}, \quad t \in \mathbb{R} \quad (21)$$

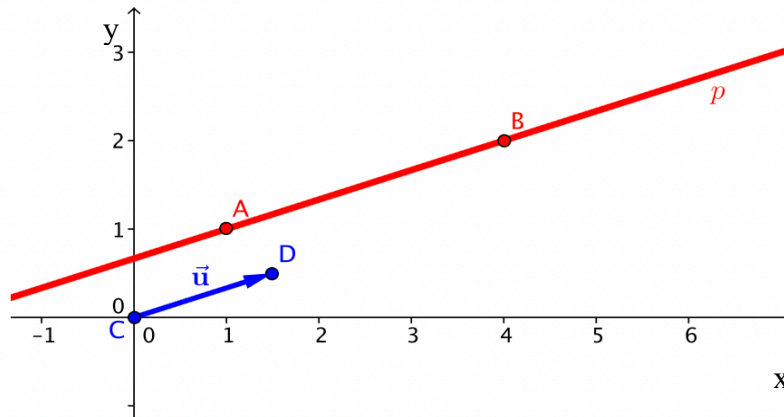
Číslo t říkáme parametr, kde předchozí rovnice vede ke známé soustavě rovnic:

$$x = a_1 + t \cdot \vec{u}_1 \quad (22)$$

$$y = a_2 + t \cdot \vec{u}_2 \quad (23)$$

$$z = a_3 + t \cdot \vec{u}_3 \quad (24)$$

Kde: X_n, A_n – n-tý bod roviny
 \vec{u} – směrový vektor
 t – hledaný parametr
 x, y, z – souřadnice bodu
 A, B – bod



Obrázek 16- přímka p a směrový vektor \vec{u} [20]

11.2.3 KRUŽNICE

Kompensace dotyku se získá výpočtem z měřeného prvku. Minimálním počtem bodů pro změření jsou 3. Jedná se o 2D prvek, který vyžaduje správný výběr pracovní roviny, do které se promítne. Kružnice v měřících programech definují tolerované průměry, jejich polohy a geometrické tolerance jsou měřeny na 7 bodech. Kružnice používané pro zaměření středů závitů jsou měřeny na 4 body. Pokud je kružnice změřena více jak třemi body je nutné vypočítat poloměr pro každý z bodů zvlášť. Zde je ukázáno řešení pro minimální počet bodů určující kružnici. V mém případě pak bude vypočítán každý bod a jeho parametry. Pro kružnici tedy platí středová rovnice ve tvaru: [11] [17] [20]

$$(x - m)^2 + (y - n)^2 = r^2 \quad (25)$$

Obecně pro každý bod:

$$(a_{i1} - m)^2 + (a_{i2} - n)^2 = r^2 \quad (26)$$

Kde pro jednotlivé body platí:

$$(a_{11} - m)^2 + (a_{12} - n)^2 = r^2 \quad (27)$$

$$(a_{21} - m)^2 + (a_{22} - n)^2 = r^2 \quad (28)$$

$$(a_{31} - m)^2 + (a_{32} - n)^2 = r^2 \quad (29)$$

Řešením těchto rovnic získáme vztahy pro n a m :

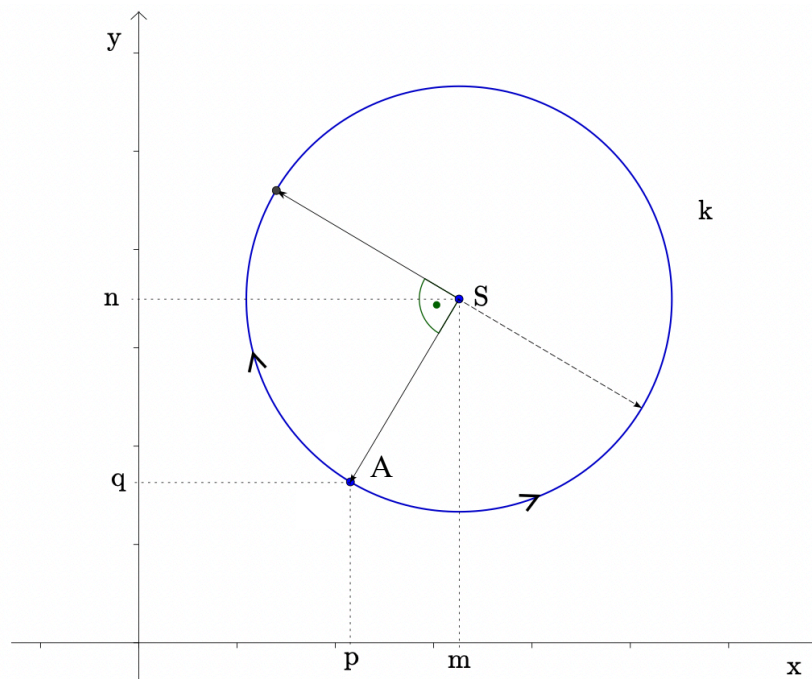
$$n = \frac{(a_{31}^2 + a_{32}^2 - a_{11}^2 - a_{12}^2) \cdot (a_{21} - a_{11}) - (a_{21}^2 + a_{22}^2 - a_{11}^2 - a_{12}^2) \cdot (a_{31} - a_{11})}{2 \cdot [(a_{32} - a_{12}) \cdot (a_{21} - a_{11}) - (a_{22} - a_{12}) \cdot (a_{31} - a_{11})]} \quad (30)$$

$$m = \frac{(a_{31}^2 + a_{32}^2 - a_{11}^2 - a_{12}^2) - 2 \cdot n \cdot (a_{32} - a_{12})}{2 \cdot (a_{31} - a_{11})} \quad (31)$$

Poloměr rovnice následně vypočítáme z rovnic pro jednotlivé body:

$$r = \sqrt{(a_{11} - m)^2 - (a_{12} - n)^2} \quad (32)$$

- kde: r – poloměr kružnice
 m, n – hledané parametry
 x, y – souřadnice bodu
 i – i -tý bod
 S – střed kružnice
 A – bod kružnice



Obrázek 17- popis kružnice [20]

11.2.4 ROVINA

Při měření roviny je kompenzace doteku vypočítána ve směru roviny, ne ve směru příjezdu k rovině. Minimální počet bodů pro její definování jsou 3. Pro výpočet roviny lze použít tyto vztahy: [11] [17] [20]

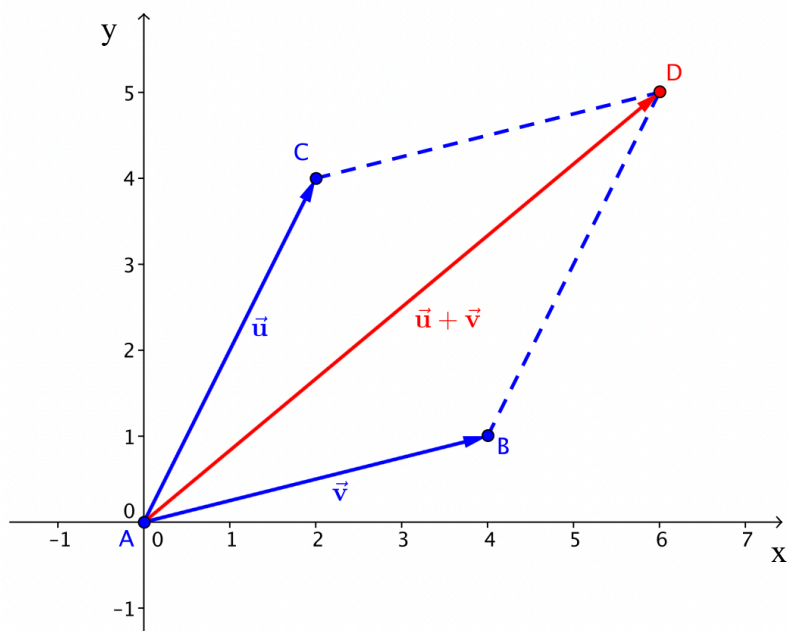
$$X_n = a_n + t \cdot \vec{u}_n + s \cdot \vec{v}_n, \quad t, s \in \mathbb{R} \quad (33)$$

$$x = a_1 + t \cdot \vec{u}_1 + s \cdot \vec{v}_1 \quad (34)$$

$$y = a_2 + t \cdot \vec{u}_2 + s \cdot \vec{v}_2 \quad (35)$$

$$z = a_3 + t \cdot \vec{u}_3 + s \cdot \vec{v}_3 \quad (36)$$

kde: X_n, a_n – n-tý bod roviny
 \vec{u}_n, \vec{v}_n – směrové vektory
 t, s – hledané parametry
 x, y, z – souřadnice bodu



Obrázek 18- popis roviny [20]

12 PRÁCE S NAMĚŘENÝMI DATY

Pro získání nám neznámých hodnot součásti je nutné proměření definovaných částí a řezů a zjistit tak tvar povrchu součásti, aby mohlo dojít k předání dat do CAD systému. Provedeme tedy tzv. digitalizaci modelu. Samotnou digitalizaci provedeme tak, že si předem definujeme plochy, které budou měřeny. Dále musíme zjistit kolik měření je potřeba provést, abychom získali dost informací o podobě měřené plochy, měříme-li kružnici stačí nám změřit minimálně 3 body. Proto abychom získali informace vypovídající o skutečném tvaru kružnice je potřeba si určit jaká data budeme požadovat, jelikož je možné na CMM stroji určovat drsnost, ale také osu z mnoha bodů. Bude tedy potřeba počet bodů v řádu tisíců, kde toto číslo se odlišují podle rozměrů měřeného elementu. Toto číslo se však může lišit v závislosti na přesnosti a počtu měření. Je tedy vhodné nalézt takovou hodnotu měření, aby bylo dosaženo odpovídajícího počtu měření a zachování co nejdelší životnosti sondy. Snímání ploch provedeme hned několikrát, abychom nasnímali celou součást. Data, která získáme v podobě polohových souřadnic X, Y a Z v souřadném systému.

12.1 ZPRACOVÁNÍ DAT

Můžeme získat až miliony nebo miliardy nasnímaných bodů. Které jsou neuspořádanou množinou 3D bodů v souřadném systému X, Y, Z. Tato množina je nazývána mračenem bodů.

Tato nasnímaná mračna bodů lze zpracovat v běžných grafických programech, které jsou určeny pro 3D modelování, v běžných grafických (programech AutoCAD a Solidworks). [14]

12.2 STANDARDY A FORMÁTY 3D DAT

Data reprezentuje 3D model, kde data jsou uložena v souboru a mají geometrický význam. Lze je zobrazit v 3D prostoru a dále je interpretovat. OpenGL je průmyslový standard pro tvorbu aplikací počítačové grafiky, nebo Direct3D jenž je jeho alternativou. Mezi nejpoužívanější formáty pro vizualizaci v interaktivním prostředí patří:

- STEP
- IGES
- STL

Pro vytvoření modelu naší součásti, budeme potřebovat jeden z těchto formátů, který si zvolíme. K vytvoření 3D modelu, je potřeba provést měření, kdy dostaneme hodnoty, které zapíšeme do textového souboru. Po několika měřeních, kdy získáme potřebná data, bude následovat převod těchto dat do programu na tvoření 3D objektů. Dnešní programy jsou schopny provádět export dat do textových formátů .txt nebo .csv. [14]

12.3 STANDARDY

12.3.1 OPENGL

Knihovna byly vyvinuta firmou Silicon Graphics Inc. jako programové rozhraní API. V tomto rozhraní je obsaženo 150 příkazů, které jsou použity pro určení objektů nebo pro vykreslení interaktivních 3D scén. Je navržen jako dynamické a hardwarově nezávislé rozhraní. Neobsahuje nijak složité příkazy pro popis 3D modelů. [14]

12.3.2 DIRECT3D

Program určený pro práci s 3D grafikou. Jedná se o komponentu sady DirectX, jenž je nejvíce rozvíjena. Disponuje širokou škálou možností zajišťující vzhled obrazu. Každému objektu lze nastavovat materiálové vlastnosti. Plochám přiřazovat barvu. [14]

12.4 FORMÁTY 3D DAT

12.4.1 STEP

(Standart for the Exchange of Product Model Data) jedná se o nový formát 3D dat, který umožňuje výměnu mezi daty CAD. Je možné jej využívat pro práci s 2D a 3D daty a dále pracovat s dalšími údaji o výrobku. Je mnohem uživatelsky přívětivější, kdy dokáže lépe převádět 3D modely a získávat lepší výsledky oproti ostatním formátům. Je možné přenášet uzavřené těleso složené z ploch čímž odpadají problémy s nespojitostmi přeneseného 3D tělesa. Avšak i u tohoto formátu přijdeme o topologii objemového solidu. Formát STEP je normalizovaná norma ISO 10303 a je rozdělena na dvě varianty STEP AP214 a STEP AP203. Kde STEP AP203 definuje geometrii, topologii a nespravuje barvy a vrstvy. Zatím co STEP AP214 obsahuje barvy, vrstvy, geometrické kótování a tolerance. [14]

12.4.2 IGES

(Initial Graphics Exchange Specification) je nejrozšířenější standart určený pro převod 2D výkresů a 3D modelů mezi systémy CAD. Je schopný přenášet křivky typu spline a plochy na bázi NURBS (Non Uniformity Rational B-spline), jenž tento formát dost omezují. Proto v tomto formátu není možné přenést celý 3D objemový model, ale pouze jeho povrch, který se skládá z obřezaných ploch. Použitím tohoto formátu zaplatíme ztrátou vnitřní logiky modelu, navíc se zde objeví problém z rozdílnými přesnostmi systémů CAD. Proto je velmi komplikované složit výsledný 3D tvar, jelikož může docházet k nepřesnému slepení ploch a vytvoření tak spojitého 3D tělesa. [14]

12.4.3 STL

(Stereolithographie) vyvinut výrobcí stereo litografických zařízení. Při převodu je objemový formát nahrazen ploškami jeho povrchu. Nejedná se moc populární formát, proto je využíván pouze na stereo litografických zařízeních. [14]

12.5 FORMÁTY DAT PRO VÝMĚNU MEZI 2D A 3D

12.5.1 DWG

(Drawing) Uzavřený formát firmy Autodesk, proto mezi výměnné formáty nepatří. Je podporován dalšími výrobci systémů CAD a to kvůli jeho rozšíření. V budoucnu je možné, že tento formát se stane novým standardem v oblasti převodu 2D dat. [14]

12.5.2 DXF

(Drawing Exchange Format) vytvořen firmou Autodesk, ale průběhem času díky jeho rozšíření jej začali používat i ostatní výrobci systémů CAD. Je podporovaný ve spoustě kancelářských a kreslicích programech (Corel Draw, Star Office). Pomocí DXF je možné přenášet 2D výkresy a 3D drátové modely těles. V současné době se jedná o nejpoužívanější formát pro výměnu 2D výkresů. [14]

13 METODY KOMPARACE 3D DAT S MODELEM POVRCHU

13.1 REVERSE ENGINEERING (REVERSNÍ INŽENÝRSTVÍ)

neboli proces jehož cílem je odkrýt fungování zkoumaného předmětu, kterými může být mechanické zařízení nebo počítačový program. Ve strojírenství či architektuře se RE využívá především pro rekonstrukci 3D modelu skutečného objektu. Dochází k naskenování bodů pomocí 3D měřících strojů a následně jsou data z měření porovnány s CAD modely součástí. Data jsou reprezentována dvěma způsoby, podle toho, jaký měřící proces byl použit na jejich získání. Pokud byl použit kontaktní způsob, tedy měření pomocí CMM strojů, dostáváme data ve formě mračna bodů. Na druhé straně, měření pomocí scannerů nám vygeneruje data ve formě 2D obrazů. V současné době zatím neexistuje software, který by zcela uspokojil požadavky na zpracování dat pomocí RE a následně jejich modelování. Proto je software vybírán podle konkrétních projektových požadavků. Software lze rozdělit do několika skupin:

- ovládání hardwaru
- manipulace s CAD entitami
- manipulace s polygony
- konstrukce polygonu a povrchu NURBS, zpracování obrazu 2D skenování a 3D modelování
- 3D kontrola a povrch NURBS a pevné modelování [2]

No.	Aplikace	Funkce
1	Hardwarová kontrola	Kontrola RE hardwaru pro získávání dat. Normálně, základní operace s daty a datové konverze jsou také poskytovány
2	Manipulace s CAD entitou	manipulace s CAD entitami, které jsou extrahovány z mračna bodů a polygonových sítí. Zahrnují body, křivky, kružnice, válce, krychle
3	Manipulace s polygony	Editace 3D polygonových dat, modifikace a optimalizace
4	polygonová a NURBS povrchová konstrukce	Poskytují kompletní sadu nástrojů pro zpracování dat, od mračna bodů až po polygonové sítě a také konstrukce povrchů
5	zpracování 2D skenu a 3D modelování	Použití pro 2D rekonstrukci snímků a jejich 3D vymodelování
6	3D kontrola	Použití pro 3D kontrolu, vytvoření mapy odchylek a jejich analýza, kontrolní zpráva a dokumentace
7	NURBS povrch a modelování	Poskytuje modelovací a editační nástroje založené na základních entitách a primitivech

Tabulka 3- Rozdělení RE [2]

13.1.1 FÁZE REVERSNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Software se skládá z několika fází pro zpracování dat. Jednotlivé fáze modelu lze tedy rozdělit do čtyř kategorií:

- body a obrázky
- polygon
- křivky
- NURBS povrchy

Tyto operace jsou pro RE nezbytné a jsou dostupné v každém softwaru, který je určený pro práci s 3D modely. [2]

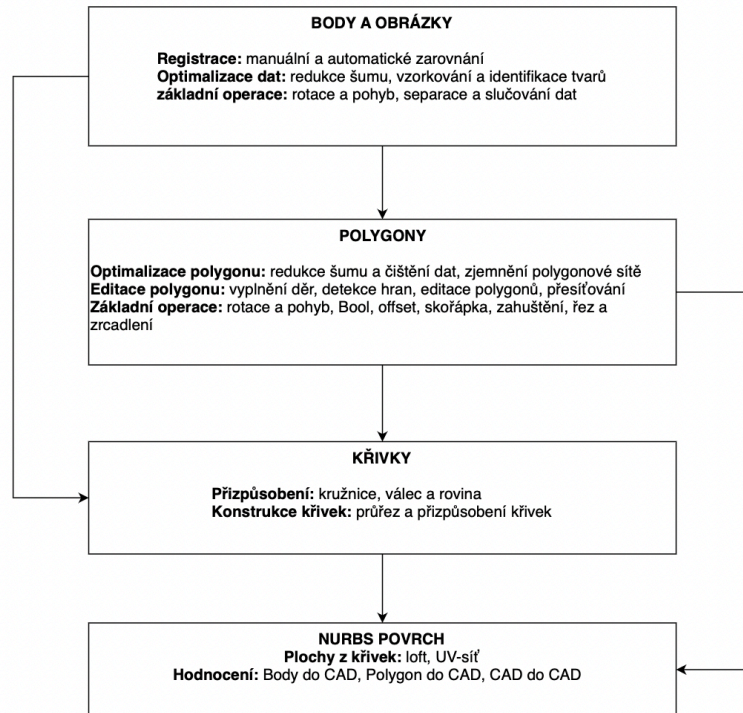


Diagram 1- fáze Reversního inženýrství [2]

13.1.2 BODOVÁ FÁZE

V této fázi dochází k zaznamenání měřených 3D dat. Ze kterých se následně vykreslují polygonové modely. Výstupem z měření jsou tedy mračna bodů. Proto abychom mohli získat potřebná data je potřeba provést několik úkonů. Nejprve je potřebné stanovit si měřený objekt nebo součást. Následně provést měření, ze kterého získáme naměřená data ve formě mračna bodů. Data se následně registrují a optimalizují. Následně dochází k optimalizaci mezi naměřenými a registrovanými daty. Dalším krokem je triangulace a její porovnání s mračny bodů. A nakonec získáme z tohoto procesu polygonový model. [2]

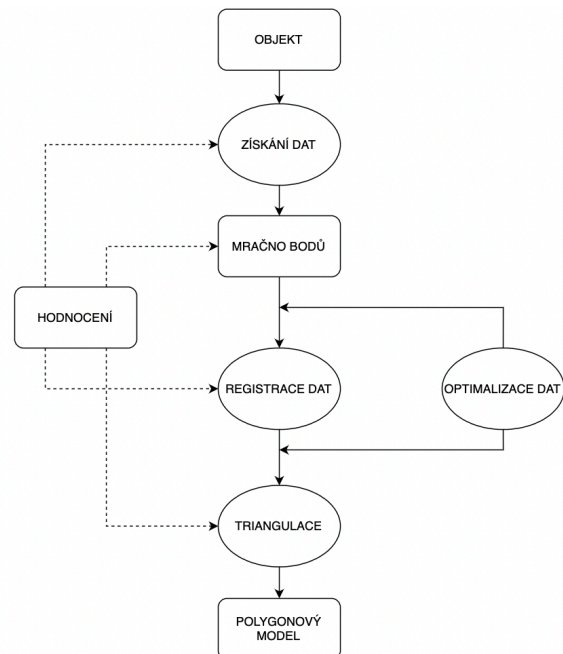


Diagram 2- postup bodové fáze [2]

13.1.3 POLYGONOVÁ FÁZE

V této fázi dochází ke konstruování polygonových modelů. Následně jsou upravovány podle požadavků aplikací. Polygonové modely se poté používají v softwarech používaných pro rychlé prototypování, 3D grafiku a animace. Dají se taky použít jako referenční 3D data pro vytváření CAD entit (body, křivky, roviny, kružnice, válce a atd.) [2]

13.1.4 KŘIVKOVÁ FÁZE

V mnoha projektech RE, zejména v RE mechanických dílů se CAD entity používají převážně jako referenční data pro modelování 3D CAD modelů. V programech CAD jsou entity modelovány přímo z mračna bodů nebo z polygonových modelů. Pro jednoduché geometrie může stačit referenční počet použitých bodů pro modelování součásti. Ke sběru dat jsou tedy využívány CMM měřící stroje. Křivky jsou nezbytné pro vytváření dílů s volnými plochami, proto je potřebné daleko více dat, proto lze měření provést na CMM, ale měření se stává zdlouhavým, jelikož potřebujeme několika násobně více dat. [2]

13.1.5 POVRCHOVÁ FÁZE

Povrchové fáze jsou někdy konečným výstupem RE pro CAD modely. Povrchy lze konstruovat pomocí entit CAD křivky nebo pomocí polygonových sítí. Jedná se o přesný způsob, jak definovat volné křivky a povrchy. Jsou užitečné z těchto důvodů:

- Jeden společný matematický tvar
- Flexibilita v navrhování tvarů
- Snižují spotřebu paměti při ukládání tvarů
- Rychlé vyhodnocení pomocí numerických algoritmů
- Jsou invariantní při perspektivních transformacích
- Jsou zobecněním B-spline a Bezierových křivek [2]

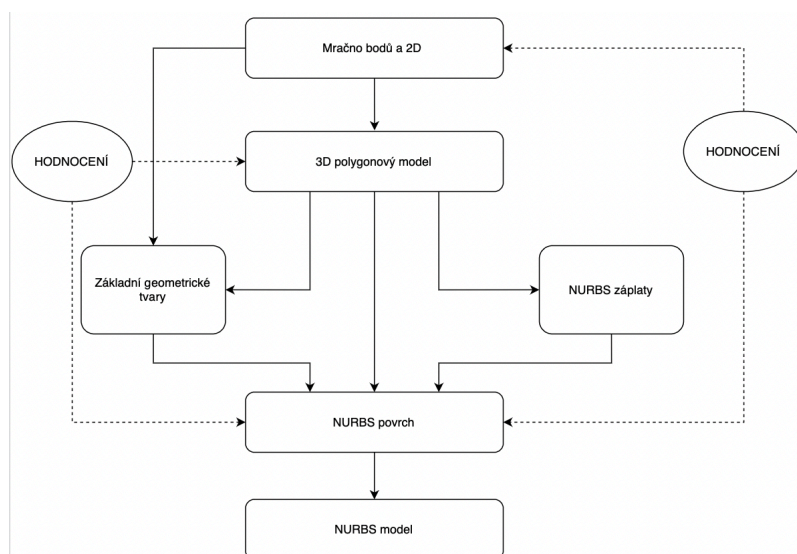


Diagram 3- postup povrchové fáze [2]

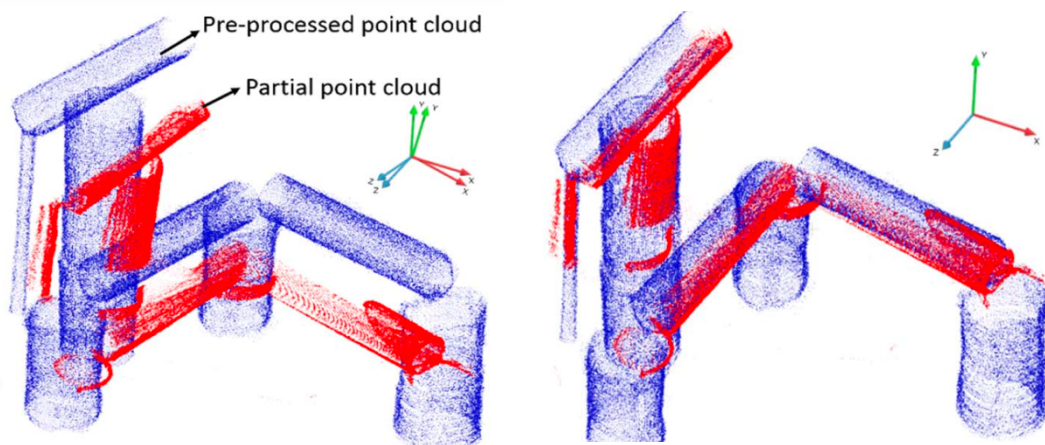
13.2 KOMPARACE MODELU

Vytvořený CAD model součásti a mračno 3D bodů zachycené při měření na CMM jsou načteny do softwaru CAI nebo CAD. Kde jsou následně data zbaveny šumu a odlehlých hodnot. Poté co jsou odstraněny nežádoucí data je vytvořen síťový povrch. Mračna bodů jsou zarovnána s CAD modely nebo s jinými mračny bodů, tato operace se nazývá registrace sady bodů. V průmyslové metrologii lze mračno bodů vyrobeného dílu zarovnat se stávajícím modelem a porovnat tak rozdíly. Z mračna bodů je možné extrahovat geometrické tolerance a rozměry. Registrace bodové sady je proces sloužící k zarovnání sad bodů neboli mračen bodů. Je nutné identifikovat rysy dat, podle kterých následně dochází k zarovnání. Poté je možné generovat barevné mapy pro zobrazení odchylek součásti vůči referenčnímu modelu. Zprávy ze softwaru pomáhají konstruktérům v rozhodování, jaké jsou potřeba provést úpravy při výrobě nebo říct, že daný kus je vhodný pro výrobu. Software následně vyhotoví inspekční zprávu o provedeném měření. [2]

13.2.1 POROVNÁNÍ MRAČEN BODŮ

Pro zarovnání předzpracovaných bodů se využívá algoritmus ICP (Iterative Closet Point). Jedná se o nejdominantnější metodu, která hledá optimální transformaci mezi dvěma datovými sadami. Minimalizuje chyby vzdálenosti a používá, dvojice nejbližších bodů ve zdrojovém a cílovém souboru dat. Postup algoritmu ICP je znázorněn ve třech krocích:

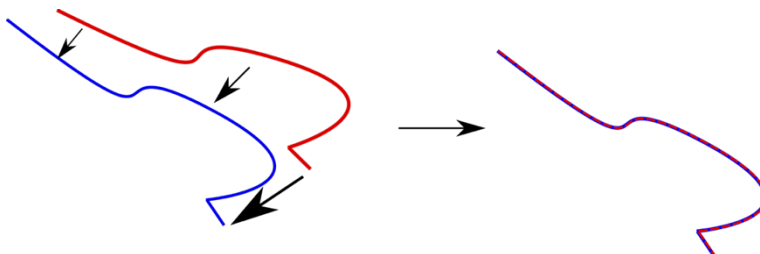
- Určení odpovídajících dvojic bodů ve vstupním a cílovém mračnu bodů
- Odhad transformace, která následně minimalizuje vzdálenosti mezi body
- Transformace k zarovnání vstupního a konečného mračna bodů [2]



Obrázek 19- Zarovnání mračen bodů [2]

13.2.2 ICP (Iterative Closet Point)

ICP volně přeloženo jako „Iterativní Nejblížeší Bod“ je algoritmus používaný k minimalizaci rozdílu mezi dvěma mračny bodů. Používá se tedy často k rekonstrukci 2D nebo 3D povrchů z různých skenovacích měření. Algoritmus má za úkol stanovit jedno mračno bodů jako referenční (modrá křivka) a druhé (červená křivka) jako pohyblivé, které se bude následně přibližovat k prvnímu, dokud s ním dokonale nesplyne (fialová křivka). [2]



Obrázek 20- Princip algoritmu ICP pro zarovnání mračen bodů [2]

14 GEOMETRICKÉ TOLERANCE

Předepisováním a definicí všeobecných geometrických tolerancí se zabývá norma ČSN ISO 2768-2. Pro tuto práci jsem vybral tolerance, které jsou vyhodnocovány. [18]

Tvaru	Přímosti	—
	Rovinnosti	▭
	Kruhovitosti	○
	Válcovitosti	⊘
	Tvaru profilu	⌒
	Tvaru plochy	⌒
Směru	Rovnoběžnosti	//
	Kolmosti	⊥
	Sklonu	∠
Polohy	Umístění	⊕
	Soustřednosti a souososti	⊙
	Souměrnosti	≡
Házení	Kruhového	↗
	Celkového	↗↗

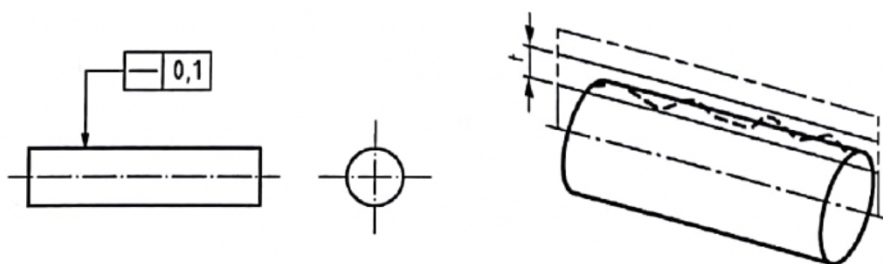
Tabulka 4- Přehled geometrických tolerancí [18]

14.1 TOLERANCE TVARU

Tolerance tvaru se nazývají geometrické tolerance. Vztahují se k jednomu prvku. Do této kategorie spadá například přímost, rovinnost, kruhovitost, válcovitost a tolerance tvaru profilu a tvaru plochy. [18]

14.1.1 PŘÍMOST

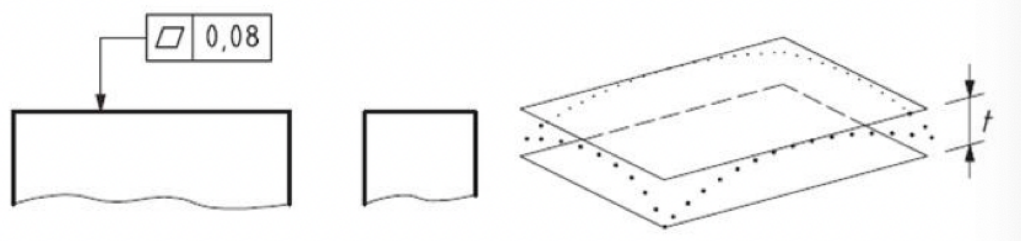
Toleranční zóna je ohraničena dvěma rovnoběžnými přímkami ve vzdálenosti t , kde každá povrchová linie tohoto válce nebo rovinné plochy musí ležet mezi těmito rovnoběžnými přímkami. [18]



Obrázek 21- Tolerance přímosti [18]

14.1.2 ROVINNOST

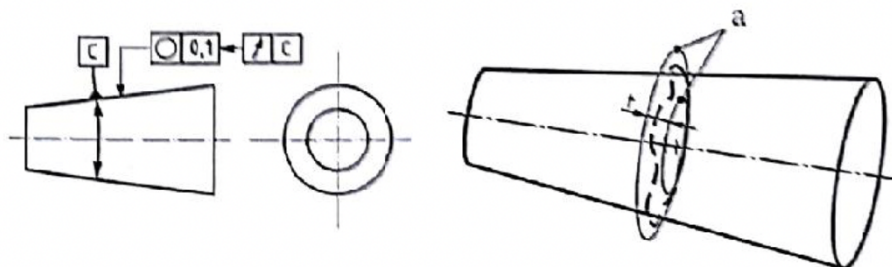
Určuje se pro rovné plochy. Toleranční prostor je tvořen dvěma rovnoběžnými plochami o vzdálenosti t . [18]



Obrázek 22- tolerance rovinnosti [18]

14.1.3 KRUHOVITOST

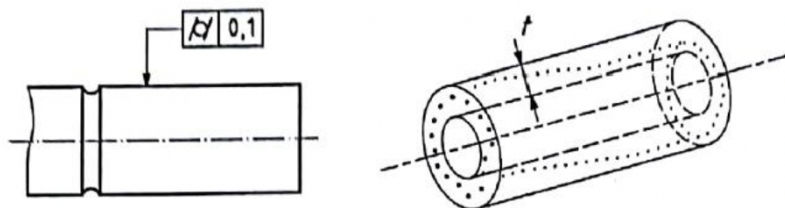
Tolerovaným prvkem tolerance kruhovitosti je kružnice nebo série kružnic. Toleranční pole je tvořeno dvěma soustřednými kružnicemi, jejichž rozdíl poloměrů se rovná hodnotě tolerance rovinnosti. V případě tolerance kuželové plochy, pokud není předepsáno jinak, je tolerance vždy kolmá k ose kuželu. V případě tolerování kulovitého prvku se nachází tolerance na ploše procházející středem tolerované koule. [18]



Obrázek 23- tolerance kruhovitosti [18]

14.1.4 TOLERANCE VÁLCOVITOSTI

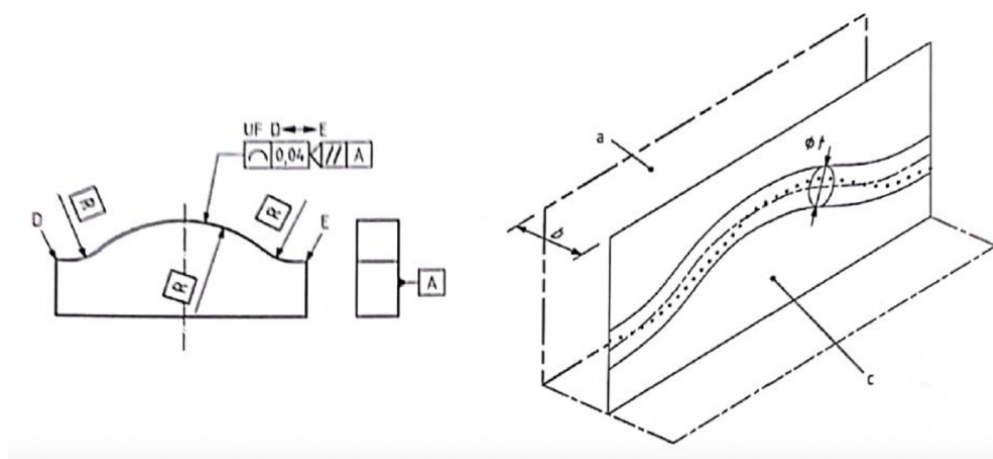
Válcové prvky lze tolerovat pomocí tolerance válcovitosti. Toleranční prostor je tvořen dvěma souosými válci, jejichž rozdíl poloměrů se rovná hodnotě tolerance válcovitosti. [18]



Obrázek 24- tolerance válcovitosti [18]

14.1.5 TVARU PROFILU

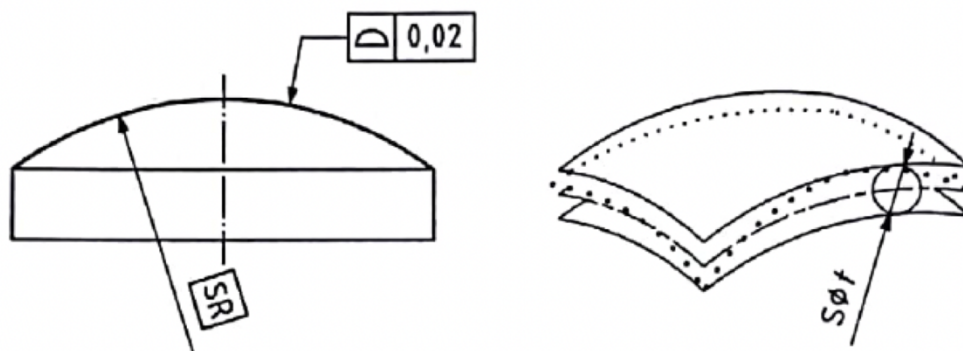
Skutečný profil tolerované čáry musí ležet mezi dvěma ekvidistantními čarami vzdálenými od sebe o předepsanou hodnotu. [18]



Obrázek 25- tolerance tvaru profilu [18]

14.1.6 TAVRU PLOCHY

Skutečná plocha musí ležet mezi dvěma ekvidistantními plochami, které obalují koule o průměru rovných toleranci tvaru plochy t . [18]



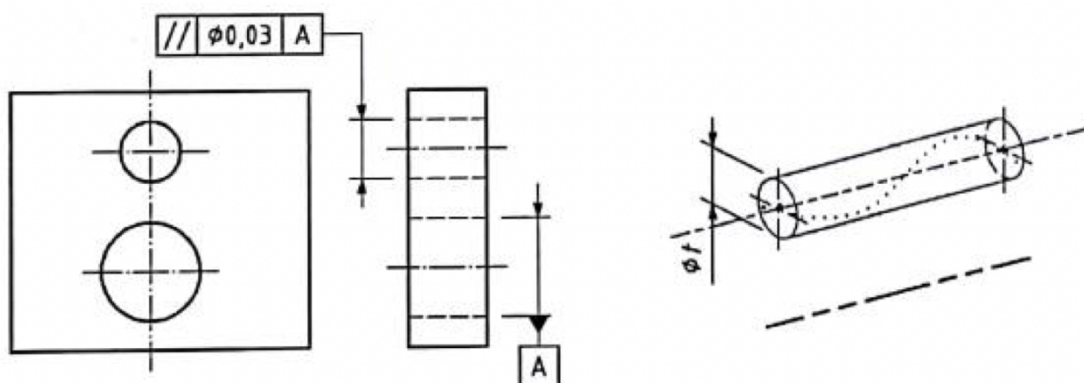
Obrázek 26- tolerance tvaru plochy [18]

14.2 TOLERANCE SMĚRU

14.2.1 ROVNOBĚŽNOST

Odvozený tolerovaný prvek musí ležet mezi dvěma rovnoběžnými rovinami, vzdálenými od sebe o hodnotu tolerančního pole, které jsou rovnoběžné s předepsanou základnou.

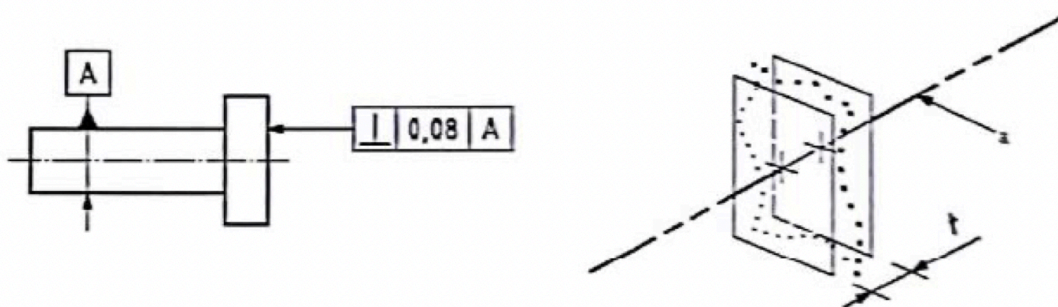
Pokud hodnotě tolerančního pole předchází \emptyset , pak se toleranční zóna nachází uvnitř válce o průměru rovném hodnotě tolerančního pole. Válec je rovnoběžný s předepsanou základnou. Toto lze použít pouze za předpokladu tolerování lineárního prvku. [18]



Obrázek 27- tolerance rovnoběžnosti [18]

14.2.2 KOLMOST

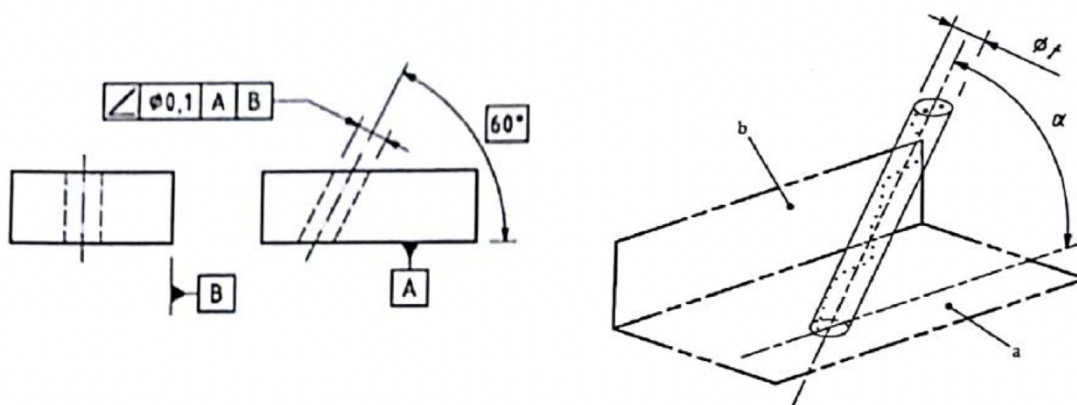
Odvozený tolerovaný prvek se nachází mezi dvěma rovnoběžnými rovinami, vzdálenými od sebe o hodnotu tolerančního pole, které jsou kolmé na předepsanou základnu. Opět je možné změnit tvar tolerančního pole na válec použitím symbolu pro průměr \varnothing před hodnotu tolerančního pole. [18]



Obrázek 28- tolerance kolmosti [18]

14.2.3 SKLON

Odvozený tolerovaný prvek musí ležet mezi dvěma rovnoběžnými rovinami, vzdálenými od sebe o hodnotu tolerančního pole, které jsou natočeny oproti předepsané základně o specificky zadanou a teoreticky přesnou hodnotu úhlu. Tvar toleranční zóny lze jako v předchozích případech změnit na válec použitím symbolu pro průměr. [18]



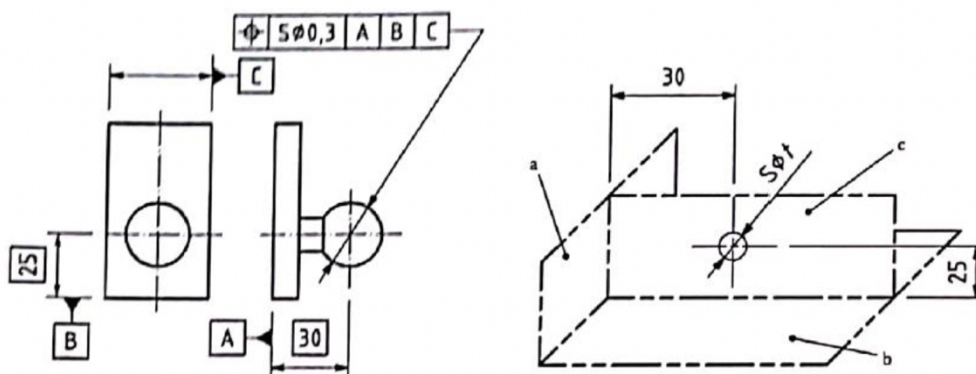
Obrázek 29- tolerance sklonu [18]

14.3 TOLERANCE POLOHY

14.3.1 UMÍSTĚNÍ

Odvozený tolerovaný prvek musí ležet mezi dvěma rovnoběžnými rovinami, vzdálenými od sebe o hodnotu tolerančního pole. Poloha toleranční zóny je dána teoreticky přesnou vzdáleností od předepsaných Základn.

Pokud hodnotě opět předchází symbol pro průměr, pak se toleranční zóna nachází uvnitř válce o průměru rovném hodnotě tolerančního pole. Toto lze použít pouze za předpokladu tolerování lineárních prvků. [18]

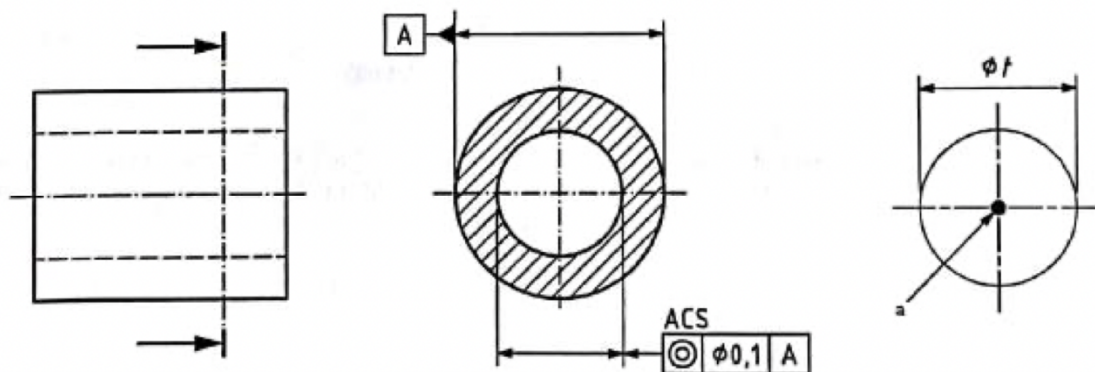


Obrázek 30- tolerance umístění [18]

14.3.2 SOUOSOST S SOUSTŘEDNOST

Odvozená tolerovaná osa musí ležet uvnitř tolerančního pole tvaru válce o průměru rovném hodnotě tolerančního pole. Osa toleranční zóny tvaru válce je shodná s osou předepsané základny.

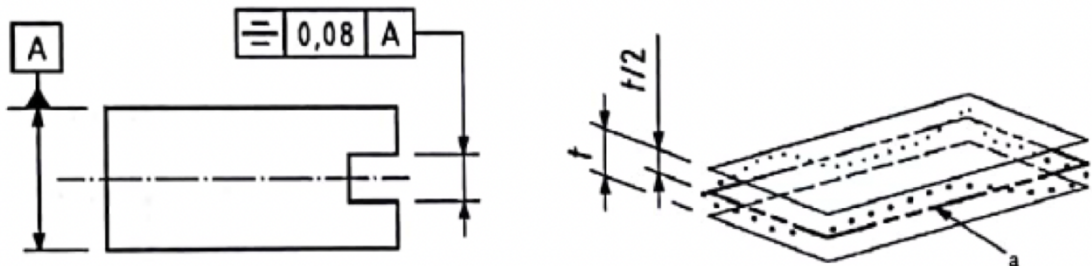
V případě, že jsou předepsané dvě základny, pak osa tolerančního válce je totožná s osou nejmenšího možného opsaného válce, vytvořeného osami předepsaných základn.



Obrázek 31- tolerance souososti a soustřednosti [18]

14.3.3 SOUMĚRNOST

Odvozená tolerovaná rovina souměrnosti musí ležet mezi dvěma rovinami vzdálených od sebe o hodnotu tolerančního pole. Tyto roviny jsou rovnoběžné s rovinou souměrnosti ploch předepsaných základnou.



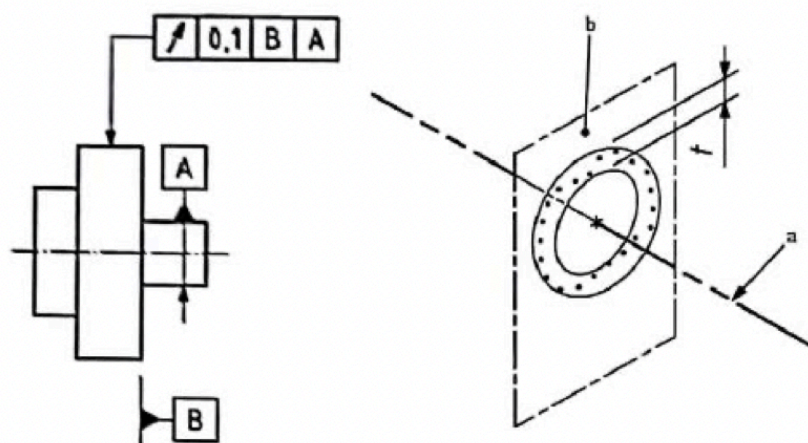
Obrázek 32- tolerance souměrnosti [18]

14.4 TOLERANCE HÁZENÍ

14.4.1 KRUHOVÉ HÁZENÍ

14.4.1.1 OBVODOVÉ (RADIÁLNÍ) HÁZENÍ

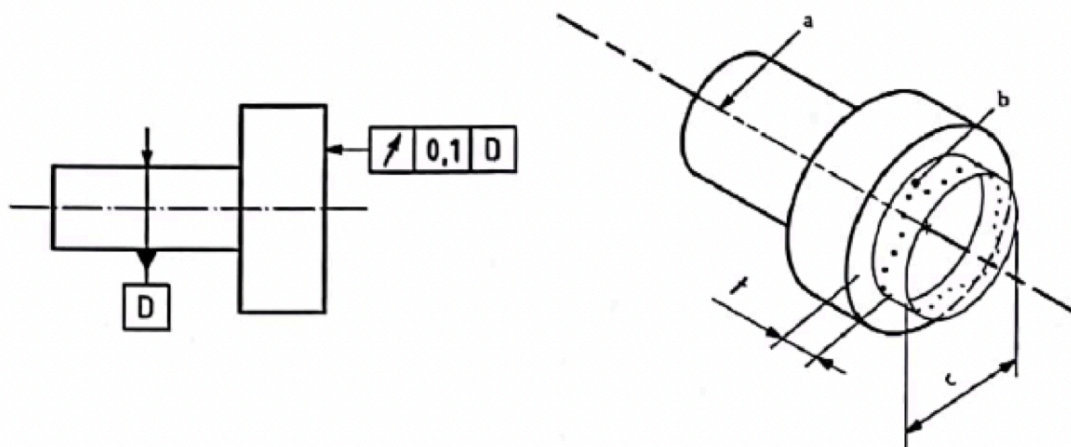
Všechny body tolerované plochy musí v libovolné rovině řezu, kolmé na osu předepsané základny, ležet mezi dvěma koplánárními a soustřednými kružnicemi s rozdílem poloměru rovným hodnotě tolerančního pole. [18]



Obrázek 33- tolerance radiálního házení [18]

14.4.1.2 ČELNÍ (AXIÁLNÍ) HÁZENÍ

Všechny body tolerované plochy musí v libovolném řezu válcovou plochou, jejíž osa je totožná s osou předepsané základny, ležet mezi dvěma kružnicemi, které jsou axiálně posunuté o hodnotu tolerančního pole. [18]

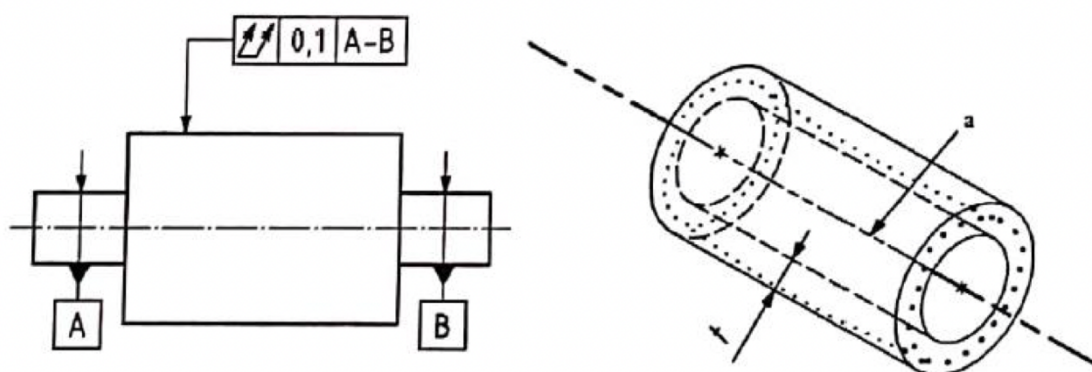


Obrázek 34- tolerance axiálního házení [18]

14.4.2 CELKOVÉ HÁZENÍ

14.4.2.1 OBVODOVÉ HÁZENÍ

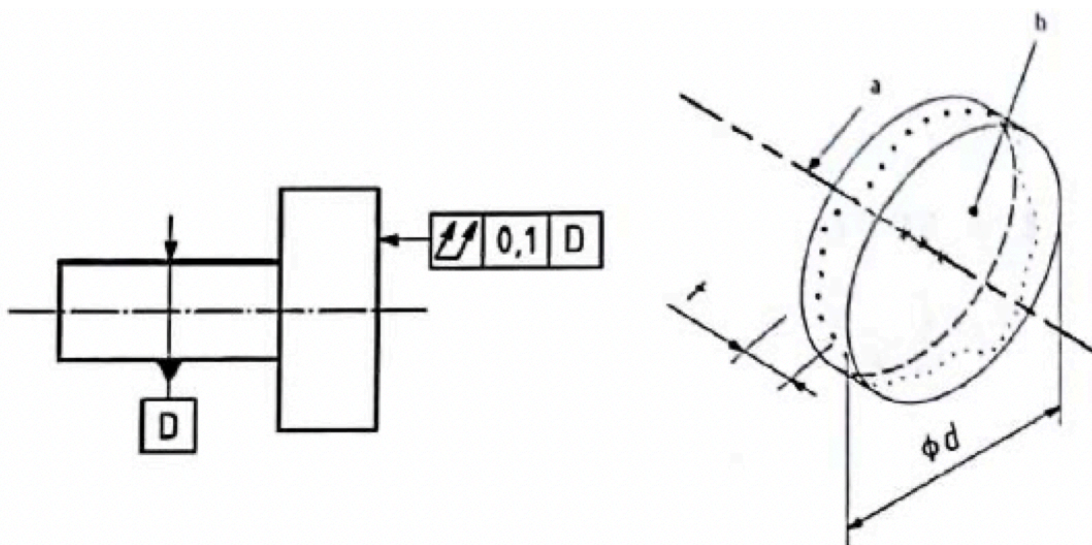
Všechny body tolerované plochy musí ležet mezi dvěma soustřednými válci, jejichž poloměry jsou odlišné o hodnotu tolerančního pole. Osa válců ohraničující toleranční pole je totožná s osou předepsané základny. [18]



Obrázek 35- tolerance celkového obvodového házení [18]

14.4.2.2 ČELNÍ HÁZENÍ

Všechny body tolerované plochy musí ležet mezi dvěma rovinami kolnými k ose předepsané základny a vzdálenými od sebe o hodnotu tolerančního pole. [18]

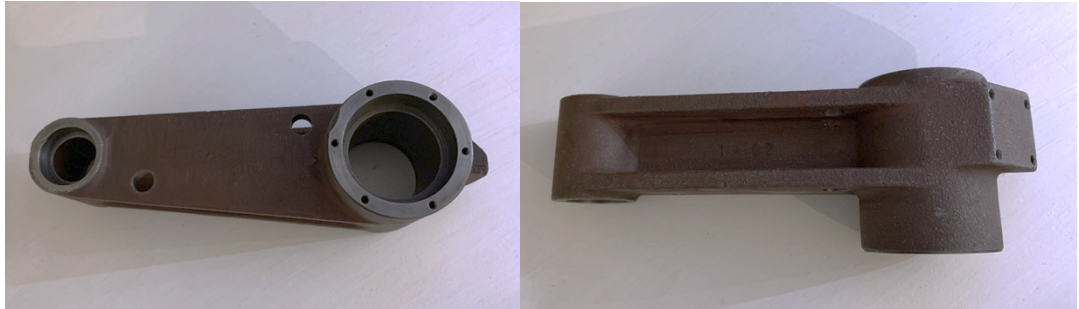


Obrázek 36- tolerance celkového čelního házení [18]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

15 MĚŘENÁ SOUČÁST

Jako měřená součást byla vybrána součást, která musí splňovat dané parametry pro měření. Abych bylo možné vyhodnotit potřebné rozměry a dokázat funkčnost programu. Proto byla vybrána součást, která reprezentuje několik kritérií, které se budou vyhodnocovat. Těmi kritérii jsou rovinnost, souosost, vzdálenost, kruhovitost atd. Zvolen byl tedy odlitek pákového zvedáku ke kotoučové pile, kde zvedák na sobě nesl pilový kotouč a na druhé straně byl připevněn pohon s řemenicí.



Obrázek 37- Měřená součást

16 CAD MODEL A VÝKRESY SOUČÁSTI

Pro vytvoření ideálního modelu, byl použit software pro 3D modelování součástí, který je používán k vytváření modelů, jejich analýze a následně k vytvoření výkresové dokumentace ve strojírenství.

Vybraná součást byla změřena a následně vytvořen model, ke kterému byla vytvořena výkresová dokumentace s potřebnými rozměry a tolerancemi. Tento model byl využit při samotném měření, kdy jsme mohli model nahrát do softwaru ZEISS CALYPSO, kde jsme tento model použili pro rychlejší měření.

17 MĚŘÍCÍ STROJ

Měření bylo provedeno na portálovém 3D kontaktním měřícím stroji od výrobce Carl Zeiss. Jedná se o model Prismo 7. S nejistotou měření pouhých $0,9 + L/350 \mu\text{m}$. Počítačem podporovaná přesnost (CAA) koriguje všechny dynamické vlivy na stroj, aby byla optimalizována přesnost i při vysokorychlostním skenování. ZEISS PRISMO se používá, když je nutné provádět spolehlivá měření s tolerancemi jeden mikrometr nebo méně. Podrobnější technické parametry stroje v příloze.

18 POSTUP MĚŘENÍ

18.1 KALIBRACE SONDY

Při samotném měření součásti je důležité dodržet postup měření. Před začátkem celého měření tak, bylo potřeba vybrat samotný měřicí dotek, případně jejich sestavu. Dotek se následně sestaví. Poté se pomocí magnetů upne do sondy na konci pinoly. Následně je potřeba dotyk kalibrovat, zjistit tak průměr kuličky a její případnou polohu vůči ostatním dotekům.

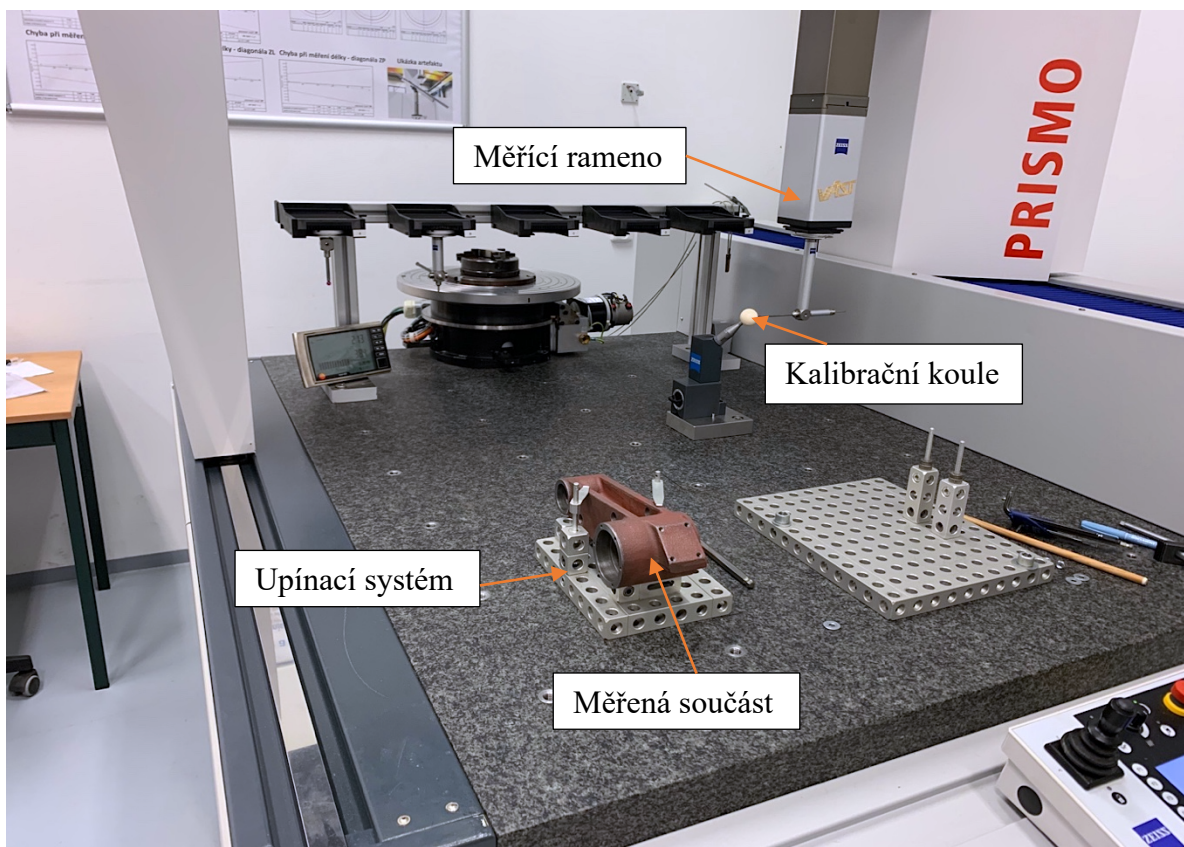
Kalibrace spočívá ve změření kalibrační koule pomocí pěti bodů, kde každý bod se nasnímá třikrát, následně je dopočítán průměr kuličky. Pro kalibraci se využívá předem určená sonda. Pokud bude v průběhu měření použito více doteků je potřeba aby kalibrační koule zůstala na stejné pozici. Vzájemná poloha doteků se počítá relativně vůči poloze kalibrační koule.

18.2 UPNUTÍ SOUČÁSTI

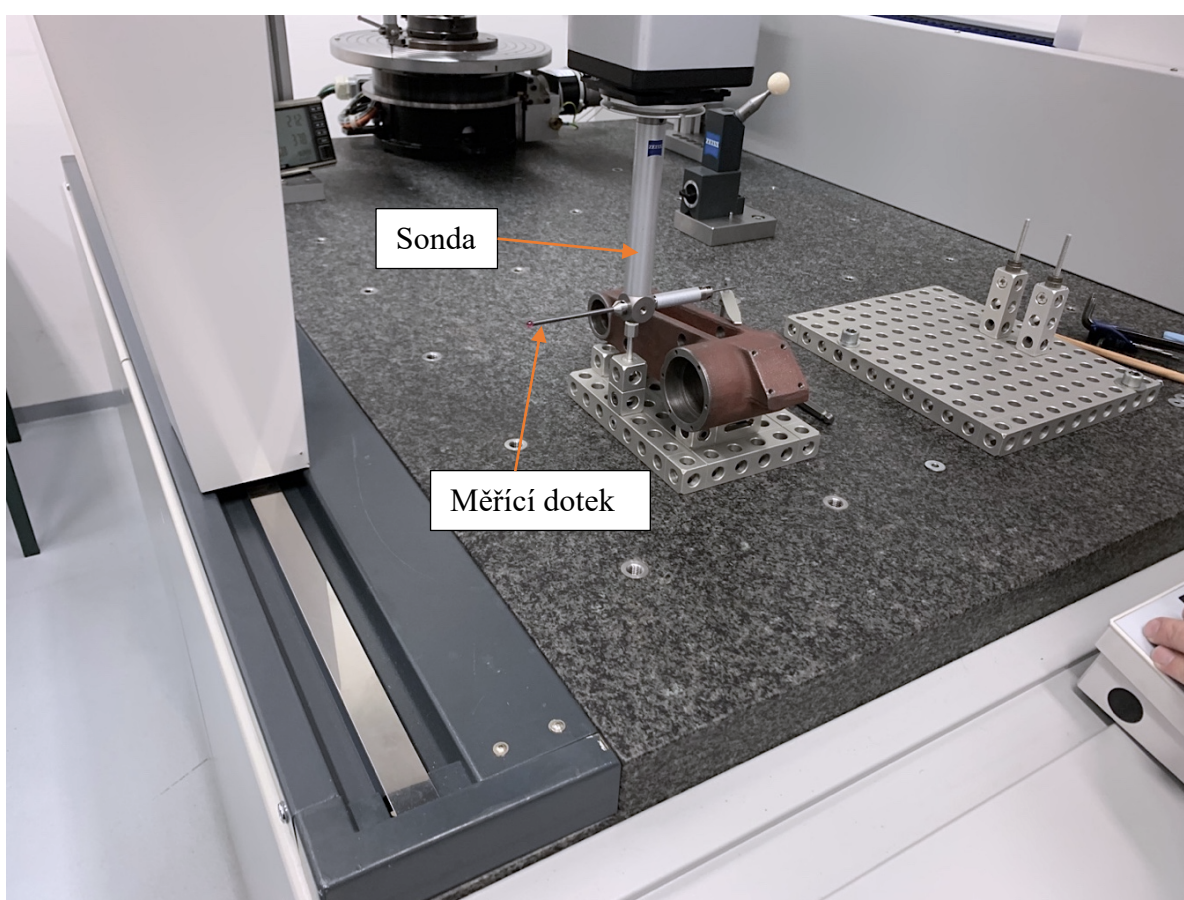
Nejprve je potřeba upnout a zajistit součást proti pohybu, aby byla zachována statická poloha a nedocházelo k pohybu. Pokud by součást nebyla ustálena a docházelo by k pohybu součásti při měření, měly by tyto pohyby vliv na výsledek měření a naměřené hodnoty by pak neodpovídali skutečnému tvaru. Pro tento účel je použito několik způsobů pro upnutí. Nejprve je nutné si vyjasnit jaká součást je měřená. V neposlední řadě záleží na materiálu, který se snímá. Měřit se dá skoro cokoli, od plastů až po různé kovy nebo jiné přírodní materiály. Je tedy nutné brát v potaz destrukci materiálu při upnutí. Například pokud bychom upínali plast do sklíčidla, či svěráku může docházet k deformaci součásti, tak vzniká chyba součásti deformací. Proto se moc nehodí pro plastové součásti silové upínání. Naopak je tomu u součástí z kovů, pro tyto je silové upnutí vhodnější, ale najdou se i měkké kovy, kde tento způsob nevyhovuje.

K upnutí mé měřené součásti, díky jejímu specifickému tvaru, bylo využito upínací stavebnice. Jedná se o hliníkové odlitky, které jsou vyrobeny s vysokou přesností. Stavebnice se skládá z mnoha komponent, mezi nejzákladnější však spadají upínací desky. K nim se následně připevňují upínací elementy, které jsou vyrobeny tak aby nedocházelo k poškození nebo deformaci.

Součást byla následně položena a připevněna do upínacího systému a následně upínací systém k desce stolu, ve kterém jsou připraveny matice pro připevnění upínacích prostředků.



Obrázek 38- Kalibrace doteku



Obrázek 39- Měření součásti

18.3 MĚŘENÍ

Proto aby mohlo být měření zahájeno jsme nejprve na STL modelu museli určit počátek souřadného systému. Dále jsme si nadefinovali měřené elementy. Následně jsme spustili měřicí program, kde stroj je schopen pracovat sám a s daty z STL modelu. Měřicí rameno si během měření samo najíždělo k součásti a měřilo mračno bodů na určených elementech.

18.4 NAMĚŘENÁ DATA

Data z měření jsme získali jako mračno bodů, kde každý bod je definován v souřadném systému X, Y, Z, kde každá hodnota představuje vzdálenost od počátku souřadného systému v *mm*. Určité mračno bodů náleží určité oblasti měření. Před samotným měřením bylo nutné definovat měřené plochy a jim přiřadit pojmenování, pod kterým se následně změřená data ukládají. Pokud porovnáme tyto data s daty získanými z 3D CAD modelu je mezi nimi patrný rozdíl a to ten, že data z CAD modelu jsou jako jedno velké mračno bodů, kde nejsou definovány jednotlivé elementy, ale je nutné data vyhledávat, zatímco data naměřená jsou již předem definována a přiřazena daným elementům.

Naměřená data je možné získat v několika formátech, proto aby bylo snadné data importovat do výpočetního softwaru, zvolil jsem si formát *.txt*. Data jsou zapsána do matice $n \times 3$, kdy sloupce reprezentují data v osách X, Y, Z a jednotlivé řádky pak udávají polohu jednotlivých bodů v prostoru.

79.8540108	55.0978448	21.110855
79.8575393	54.99258	21.9279339
79.8582717	54.8131405	22.6693608
79.8575443	54.5283444	23.4135993
79.8574816	54.1453616	24.1075606
79.8600029	53.681711	24.7778704
79.8592462	53.1275959	25.3691178
79.8619993	52.4946169	25.8831348
79.8558003	51.8136858	26.2922766
79.8553563	51.0231091	26.6711961
79.8603849	50.2828197	26.8859061
79.8600154	49.4868723	27.0196183
79.8618674	48.6848083	27.0343312
79.8591274	47.9031821	26.9530948
79.8551576	47.1286713	26.7639231
79.8592086	46.379879	26.4920156
79.8590232	45.6791596	26.13459
79.8588446	45.019914	25.6830937
79.8585242	44.4415939	25.1594134
79.8590199	43.9339543	24.5631957
79.8549827	43.5197378	23.9119582
79.8584945	43.1808709	23.2020853
79.8605031	42.8992824	22.4582983
79.8599792	42.7342961	21.7184793
79.8576193	42.6495044	20.9431221
79.8572072	42.6654384	20.1782998
79.8557257	42.7817825	19.4187254
79.8567922	42.9942516	18.7012444
79.8557247	43.3014411	18.0193863
79.8610026	43.6937627	17.3761473

Tabulka 5- ukázka naměřených dat

19 ZPRACOVÁNÍ DAT

Pro zpracování dat měření byl zvolen program od společnosti MathWorks MATLAB & Simulink. Jedná se o velmi výkonný jazyk pro technické výpočty. Integruje výpočty, vizualizaci a programování do jednoduše použitelného prostředí, kde problémy i řešení jsou vyjádřeny v přirozeném tvaru. Základním datovým typem je dvourozměrné pole. Díky této funkci umožňuje snadné řešení mnoha technických problémů, které vedou na vektorovou nebo maticovou formulaci, v mnohem kratším čase, než klasické programovací jazyky jako je C. typickými oblastmi použití jsou:

- Matematické výpočty
- Modelování
- Analýza a vizualizace dat
- Měření a zpracování dat
- Vývoj algoritmů
- Návrhy řídicích systémů

Získaná data mohou být v několika formátech, jelikož již existují potřebné funkce v prostředí matlab pro jejich otevření. Můžeme si tedy vybrat z textových formátů *.txt* nebo *.csv*. Data je možné importovat z Excelu nebo jemu dalších podobných softwarů. Nebo ze softwarů přímo určených pro vytváření 3D modelů.

20 PROGRAM A DIAGRAM

Program je navržen tak, aby mohl vyhodnotit výsledky z měření na CMM stroji. Je tedy rozdělen do několika částí. V prvním bodě je proveden klasický postup pro odmazání nežádoucích dat a vyčištění programového prostředí. Dalším krokem je nahrání dat z měření ve formátu *.txt*. Jelikož data jsou v jednotlivých textových souborech pro dané měřené tvary je program rozdělen na několik samostatných částí pro vyhodnocení dat a získání potřebných parametrů. Data jsou porovnávána s rozměry z výkresové dokumentace a následně je z těchto výsledků vyhotoven měřicí protokol.

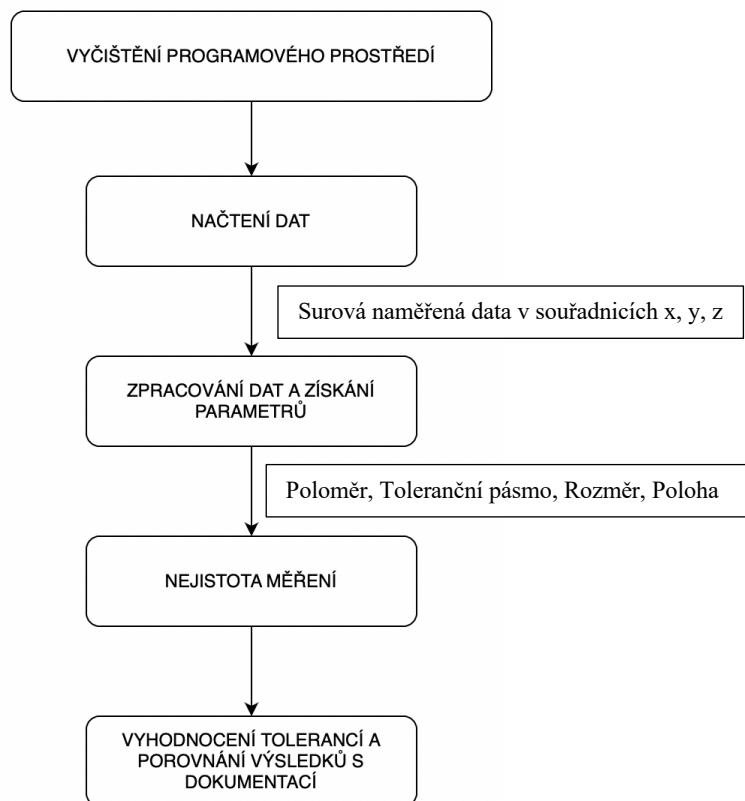


Diagram 4- Proces programu

20.1 FUNKCE FITPLANE A FITCIRCLE

20.1.1 FIT PLANE

Je použita již vytvořená funkce *fitplane*. Tato funkce je postavena na základě metody nejmenších čtverců pro určení parametrů roviny. Funkce *fitplane* je popsána rovnicí:

$$z(x, y) = a \cdot x + b \cdot y + c \quad (37)$$

Kde získám koeficienty roviny z matice ve tvaru:

$$\begin{bmatrix} x_0 & y_0 & 1 \\ x_1 & y_1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_0 \\ z_1 \\ \dots \\ z_n \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$Ax = B \quad (39)$$

Jelikož je použito více bodů, než minimální požadovaný počet je potřeba použít levou pseudoinverzní matici ve tvaru:

$$A^+ = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (40)$$

Metoda nejmenších čtverců je numerická vyrovnávací metoda. Je použita k nalezení takového vyrovnání měření, aby součet druhých mocnin chyb nalezeného řešení byl minimální. Zjednodušeně, aby součet čtverců odchylek byl nejmenší.

20.1.2 FIT CIRCLE

Taubinův fit se velice podobá fitu od Pratta, ve svém výkonu a designu. Taubinovo fitování má výhodu v tom, že může být zobecněno na elipsy a další algebraické křivky. Pomocí této funkce získám proložení naměřených dat kružnicí, odkud následně získám střed a poloměr kružnice. Tuto metodu popisuje rovnice: [15]

$$\mathcal{F}_1 = \sum_{i=1}^n d_i^2 (d_i + 2R)^2 \quad (41)$$

Kde následně za předpokladu $|d_i| \ll R$ získáme rovnici:

$$\mathcal{F}_1 \approx 4R^2 \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (42)$$

$$R^2 \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 \quad (43)$$

$$\mathcal{F}_1 \approx \frac{4}{n} \left[\sum_{i=1}^n (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n d_i^2 \right] \quad (44)$$

Ve skutečnosti chceme minimalizovat $\sum d_i^2$ toho dosáhneme minimalizací následné funkce:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_4(a, b, R) &= \frac{\sum[(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2]^2}{4n^{-1} \sum(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} \\ &= \frac{\sum[z_i - 2ax_i - 2by_i + a^2 + b^2 - R^2]^2}{4n^{-1} \sum[z_i - 2ax_i - 2by_i + a^2 + b^2]} \end{aligned} \quad (45)$$

V tomto okamžiku přejdeme na parametry algebraického kruhu (A, B, C, D) :

$$a = -\frac{B}{2A} \quad (46)$$

$$b = -\frac{C}{2A} \quad (47)$$

$$R^2 = \frac{B^2 + C^2 - 4AD}{4A^2} \quad (48)$$

$$\mathcal{F}_4(A, B, C, D) = \frac{\sum[Az_i + Bx_i + Cy_i + D]^2}{n^{-1} \sum[4A^2z_i + 4ABx_i + 4ACy_i + B^2 + C^2]} \quad (49)$$

Kde: x, y, z – souřadnice bodu
 $ABCD$ – parametry
 a, b – souřadnice středu
 R – poloměr
 n – n-tý bod

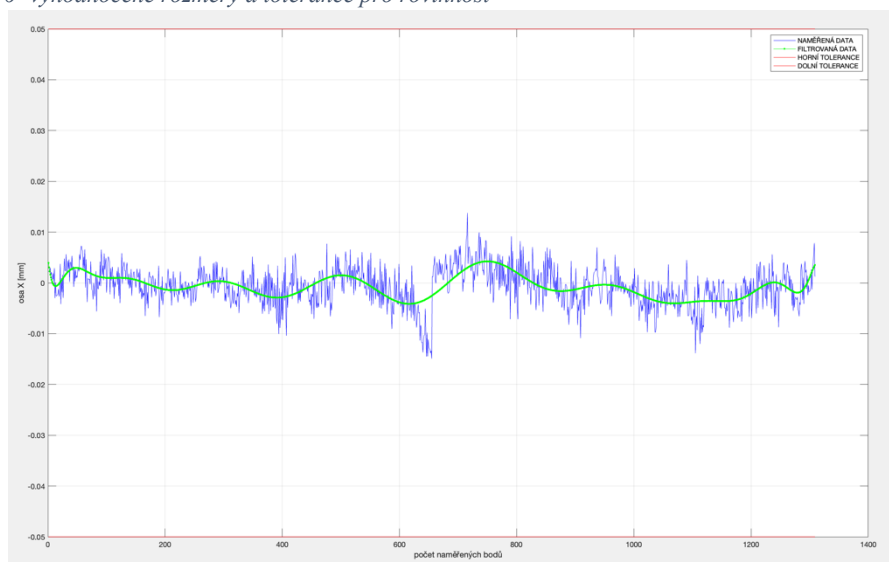
21 VYHODNOCENÍ

21.1 ROVINNOST PLOCHY

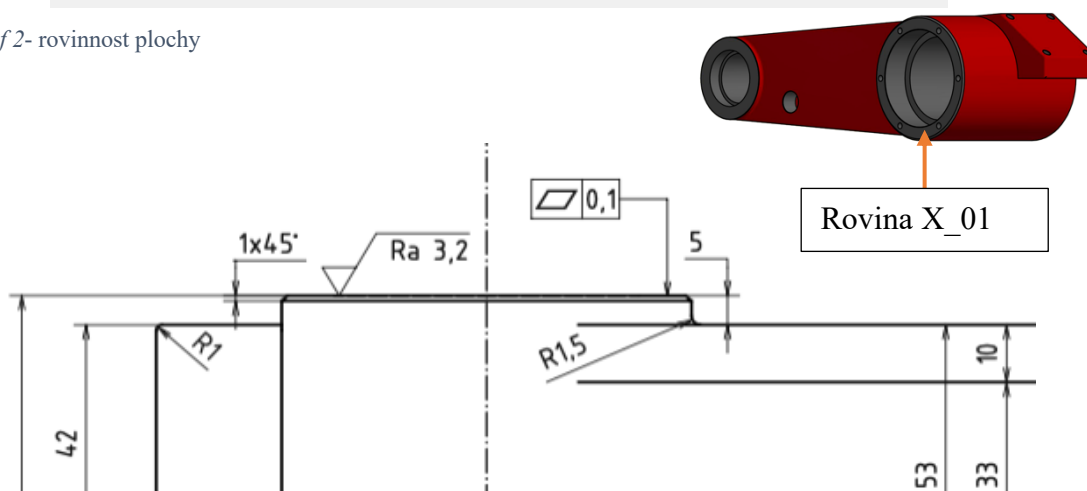
Rovinnost plochy je vyhodnocena v ose směru roviny, tedy v ose x. Kdy byla použita funkce fitplane, pro výpočet parametrů roviny. Následně je vytvořen řez osou x. Kdy surová data jsou reprezentována modrou křivkou. Pro její vyhlazení je použita funkce *polyfit*, s hodnotou polynomu dvacet. Filtrovaná data tak reprezentuje zelená křivka. V odfiltrovaných datech byla nalezena maximální a minimální hodnota, následně výsledek rozdílu těchto hodnot udává hodnotu rovinnosti plochy. Tato hodnota je následně porovnána s hodnotou tolerance.

NÁZEV	HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
ROVINY					
ROVINA_X01	0.028673700	0	0.1	0	0.02867370
POLOHA_X01	-0.00062570	0.00000000	0.3	-0.3	-0.00062570

Tabulka 6- vyhodnocené rozměry a tolerance pro rovinnost



Graf 2- rovinnost plochy



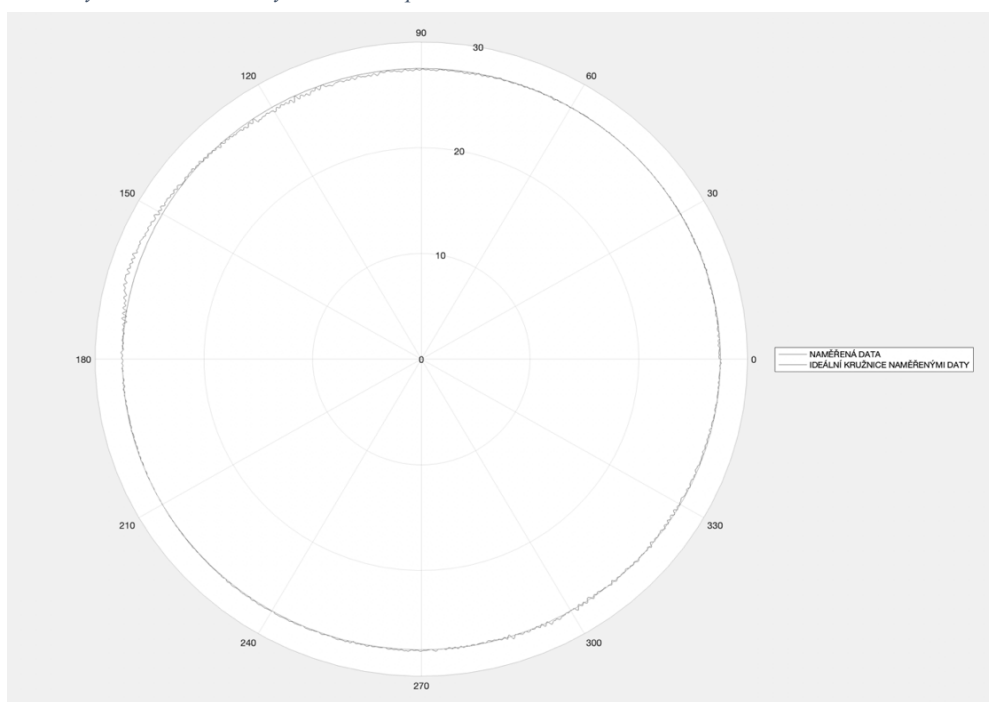
Obrázek 40 – dokumentace tolerance rovinnosti

21.2 KRUHOVITOST VÝVRTU PRO LOŽISKO

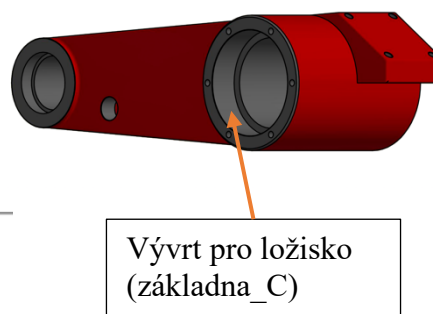
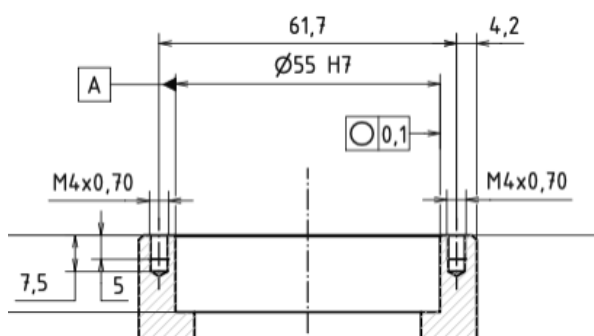
Kruhovitost je vyhodnocena opět pomocí funkce fitcircle. Kde je opět potřeba vědět střed ideální kružnice proložené naměřenými daty. Následně je vypočten poloměr. Ze známého ideálního poloměru jsou vytvořeny dvě kružnice, jejichž rozdíl poloměrů udává hodnotu zadané tolerance. Z naměřených dat a známého středu je pomocí for cyklu spočten ke každému bodu poloměr. Následně je nalezena maximální a minimální hodnota poloměrů, kde opět jejich rozdíl udává hodnotu. Tato hodnota se musí vejít do rozmezí tolerančního pásma. Z výsledku je patrné, že pro kruhovitost základny A vyšel naměřený rozdíl 0.04747 mm . Od této hodnoty je již odečten poloměr. Následně je hodnota porovnána s hodnotou tolerance, odkud je patrné že vypočtený výsledek je menší než horní hrana tolerance a zároveň vyšší než spodní hrana tolerance.

NÁZEV	HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
PRŮMĚR A KRUHOVITOST					
ZÁKLADNA_C_PRŮMĚR	55.00056590	55.00000000	0.03	0	0.00056590
ZÁKLADNA_C_KRUHOVITOST	0.047473351	0	0.1	0	0.047473351

Tabulka 7- vyhodnocené rozměry a tolerance pro kruhovitost



Graf 3- kruhovitost vývrtu pro ložisko



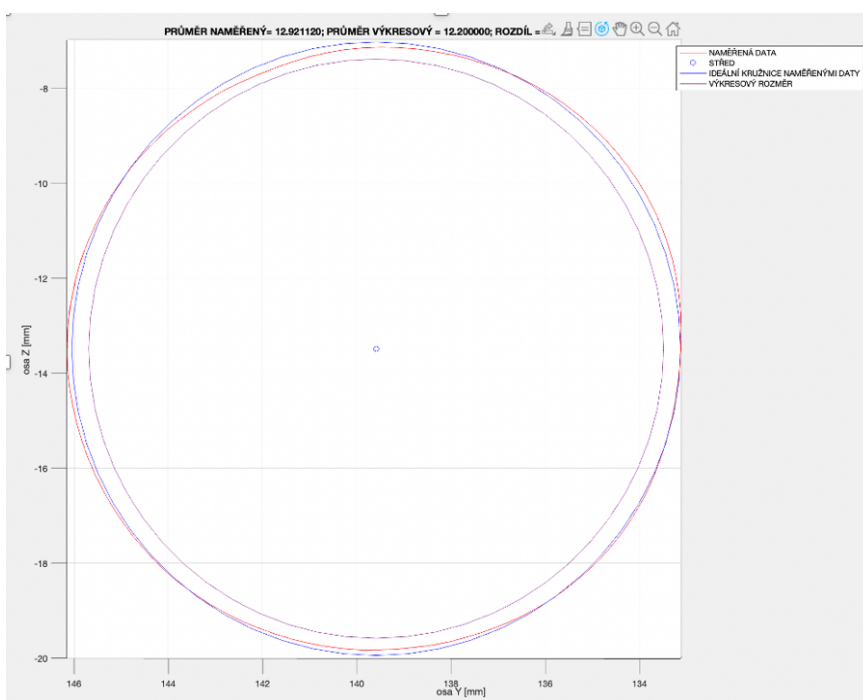
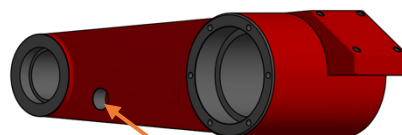
Obrázek 41 – dokumentace tolerance kruhovitosti vývrtu

21.3 PRŮMĚR DÍRY

Vyhodnocení průměru díry je docíleno tak, že je spočten poloměr a střed kružnice pomocí funkce *fitcircle*, naměřenými hodnotami. Z obrázku 24 je patrný rozdíl mezi výkresem předepsaným průměrem a průměrem změřeným. Také je vidět kruhové házení modré křivky vůči křivce ideální červené křivce. Jelikož křivka je změřena 115 body. Díky tomuto počtu bodů lze vidět tvarové odchylky kružnice, nicméně pokud bychom chtěli řešit drsnost otvoru bylo by potřebné získat několikanásobně více nasnímaných bodů, přibližně v řádu tisíců až desetitisíců v závislosti na velikosti měřené plochy. Pokud se porovnájí výsledky mezi obrázky 24 a 25, je zřejmé, že obrázek 25, který byl měřen na minimální počet bodů pro určení kružnice již neukazuje tvarové odchylky otvoru.

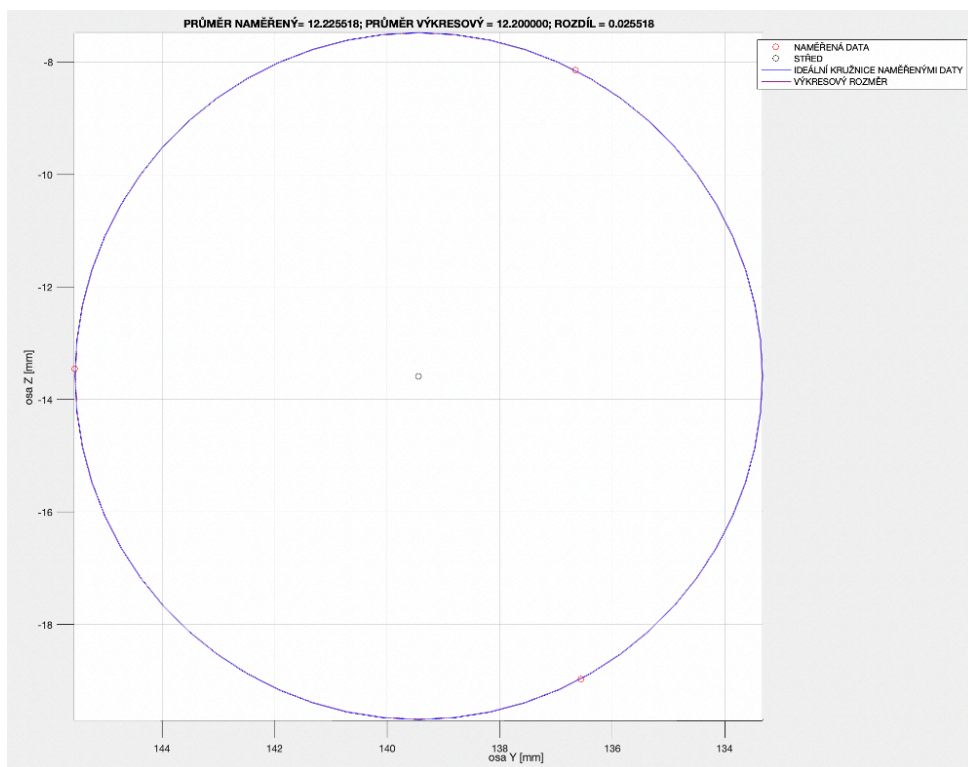
NÁZEV	HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
D_12_2	12.92112018	12.2000000	0.333	-0.333	0.72112018

Tabulka 8- vyhodnocené rozměry a tolerance pro rozměr díry

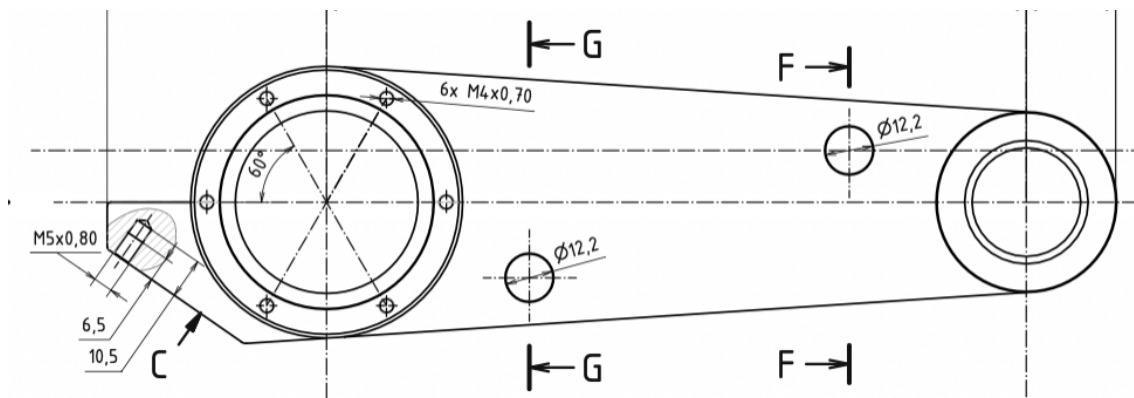


Díra_D12

Graf 4- Kružnice o průměru 12,2 mm měřena 115 body



Graf 5- Kružnice o průměru 12,2 mm měřena 3 body



Obrázek 42 – dokumentace průměr děr

21.4 VÁLCOVITOST DÍRY PRO HŘÍDEL

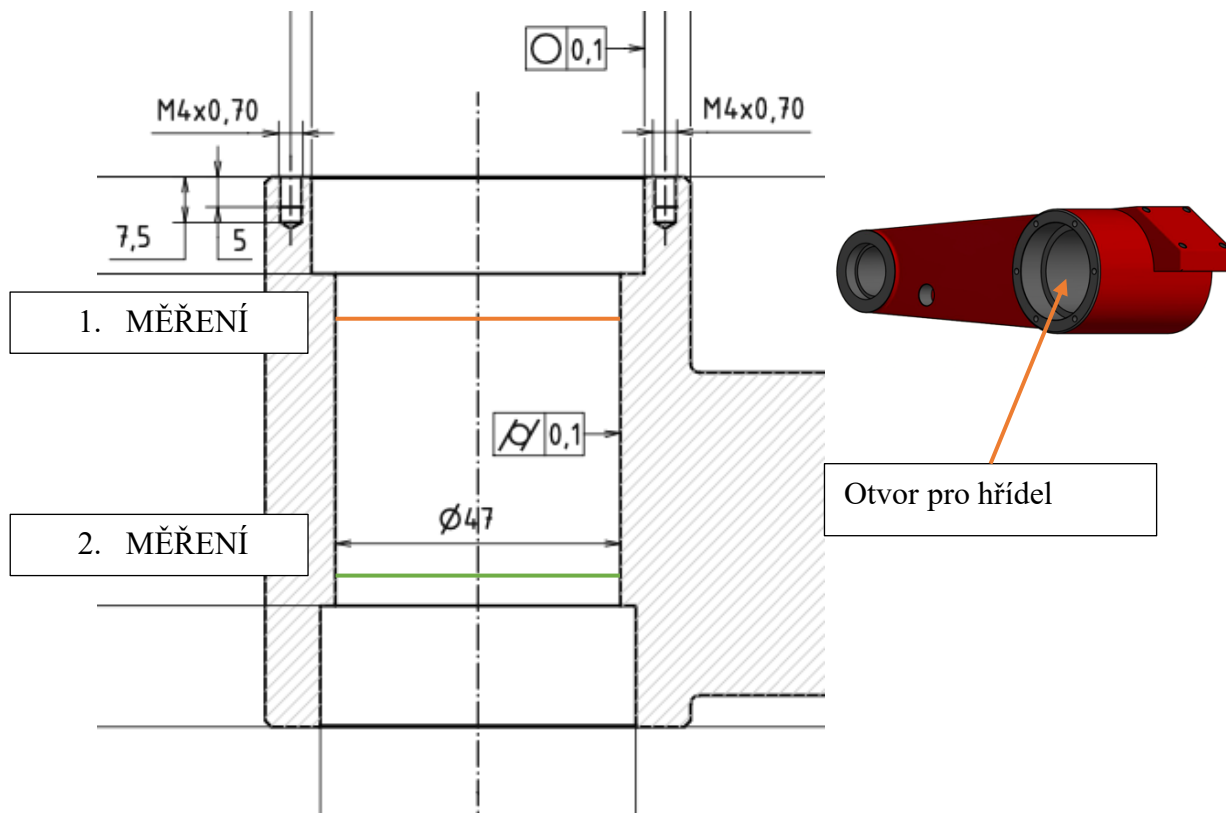
Válcovitost je vypočtena podobně jako jsou vyřešeny kruhovitosti základen pro ložiska. Opět je využito funkce fitcircle. Jelikož se jedná o válec je na měřen ve dvou úrovních. Nejdříve tedy bylo nutné vypočítat polohy středů a průměry jednotlivých kružnic. Následně z polohy závitů byla vypočtena jejich vzdálenost a následně byl zjištěn společný střed. K tomuto středu byli zjištěny poloměry ke každému z bodů. Dále byla nalezena minimální a maximální hodnota poloměrů. Kde z jejich rozdílu jsem zjistil hodnotu, která udává hodnotu válcovitosti. Tato hodnota se nakonec porovnála s výkresovou hodnotou tolerance pro válcovitost.

NÁZEV	HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
D28	0.61471792	0.00000000	0.1	0	0.61471792

Tabulka 9- vyhodnocená válcovitost díry pro hřídel



Graf 6- válcovitost D28



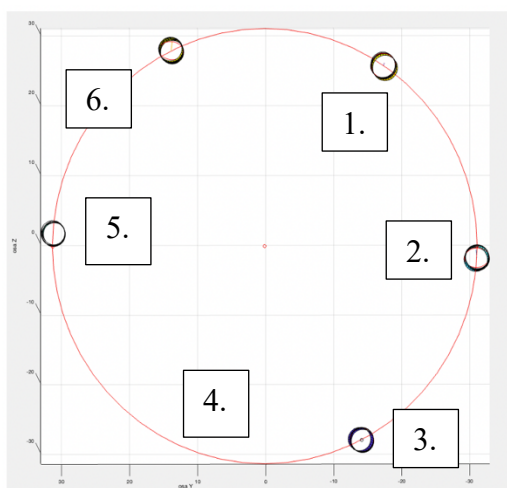
Obrázek 43 – dokumentace tolerance válcovitosti

21.5 ZÁVITY A JEJICH POLOHA

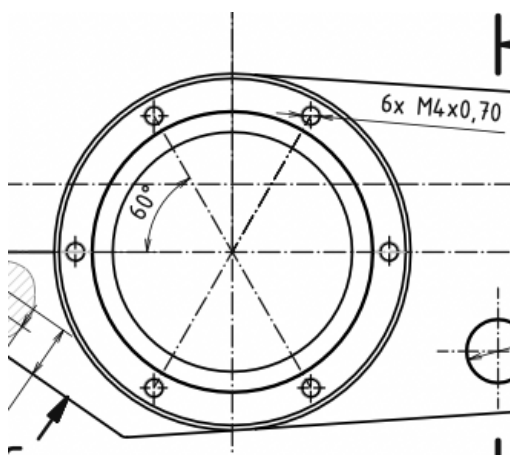
Průměr závitu je vypočten funkcí *fitcircle*, kde jsme získali střed a střední průměr závitu. Hodnota průměru je následně porovnána s tabulkovou hodnotou pro závit *M4x0.70*. Poloha závitu je určena pomocí známých středů všech závitů. K těmto středům je vytvořena kružnice pomocí *fitcircle*. Kde získáme polohu středu kružnice, která prochází středovými osami závitů. Následně proto, aby se dala určit poloha jednotlivých závitů, musel být vytvořen počáteční bod, od kterého bude zjištěna odchylka, tak hodnota polohy. Tento bod se nachází na souřadnicích $y = \text{poloměr kružnice středů}$, $z = 0$, jelikož je z výkresů patrné že dva závity 2 a 5 by měli ležet v ose $z = 0$. Když znám nominální bod počátku a středy závitů, je možné spočítat odchylku mezi nominální polohou a skutečnou polohou závitu. Hodnoty pro závit číslo 4, se při ukládání dat neuložili, bohužel měření již nebylo možné opakovat, pouze pro tento potřebný rozměr. Pokud by tento rozměr měl být změřen, znamenalo by to opakování celého měření.

ZAVIT_M4_6		3.58763253	3.54500000	0.008	0	0.04263253
POLOHA_ZAVIT_M4_6		63.33292826	60	0.333	-0.333	3.332928261

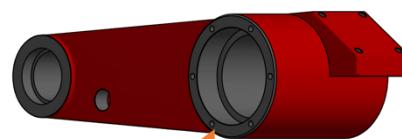
Tabulka 10- Poloha závitů



Graf 7- Polohy závitů



Obrázek 44- polohy závitů



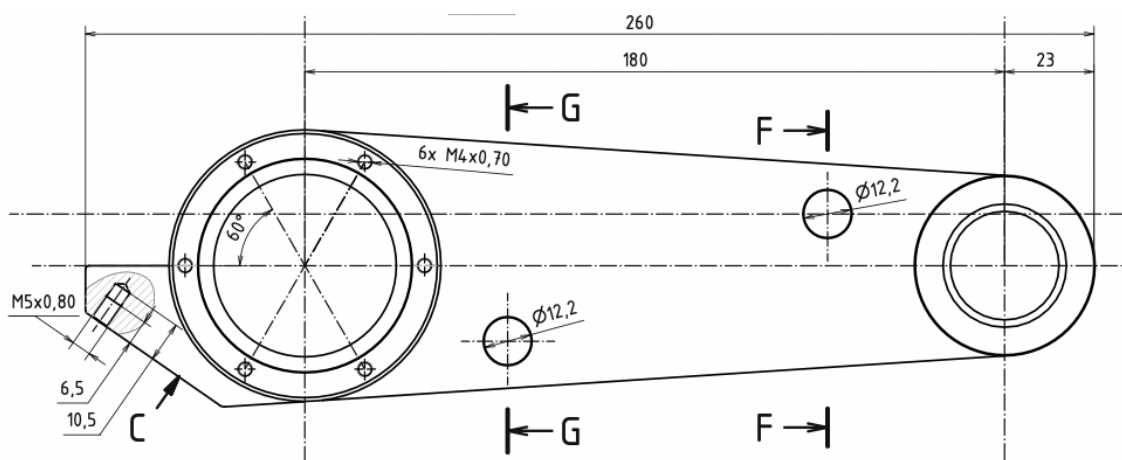
6x Závit pro montáž víčka

21.6 DÉLKOVÉ ROZMĚRY

K vypočtení rozměru vzdálenosti středů děr pro ložiska je použita rovnice 28. Je zde vidět velmi velký rozdíl naměřeného rozměru oproti rozměru, který je předepsán výkresem, to v prvním případě mezi základnami C a D o hodnotu 6.5567 mm a v případě druhém mezi základnami E a F o hodnotu 4.7696 mm .

ZAK_C_TO_ZAK_E		186.556736219	180.0000000	0.3	-0.3	6.5567362
ZAK_D_TO_ZAK_F		184.7696392	180.0000000	0.3	-0.3	4.7696392

Tabulka 11- délkové rozměry



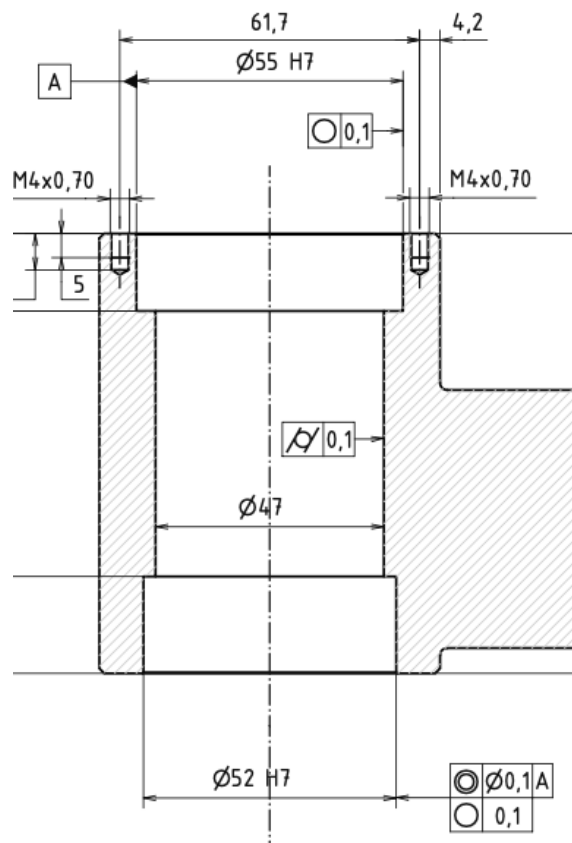
Obrázek 45 - dokumentace vzdálenost středových os základen

21.7 SOUOSOST VÝVRTŮ PRO LOŽISKA

Souosost základen je opět vypočtena jako rozdíl dvou bodů, jelikož pokud chceme vypočíst společnou osu je nejprve nutné si určit referenční střed, kde procházející osa kopíruje normálový vektor otvoru základny A, hodnota souososti je nulová pokud druhý střed bude ležet na této přímce, v opačném případě se jedná o rozdíl mezi těmito body, ze kterého získáme hodnotu odchylky souososti.

ZAK_C_TO_ZAK_D		0.000150913	0.000000000	0.1	0	0.00015091
----------------	--	-------------	-------------	-----	---	------------

Tabulka 12- Souosost vývrtů pro ložiska



Obrázek 46- dokumentace tolerance sousosti vývrtů

22 ZÁVĚR

V první části je popsáno souřadnicové měření na CMM strojích. Jsou zde zmíněny konstrukční uspořádání stroje. Je zmíněna měřicí sonda a její konstrukční popis, kde je vysvětlen přenos signálu mezi sondou a řídicím počítačem. Jsou popsány materiály, ze kterých je sonda vyrobena. Jako další je popsán samotný průběh měření, následně i chyby a nejistoty, které při měření vznikají. V neposlední řadě je vysvětlen postup komparace dat a jsou definovány geometrické tolerance.

V druhé kapitole je popsána měřená součást, ke které je vyhotovena výkresová dokumentace a CAD model. Dále je zde popsán konkrétní souřadnicový stroj, na kterém bylo měření provedeno. Důležitou součástí je i postup při samotném měření, především upnutí součásti na měřicím stole stroje, tak aby nedocházelo k neočekávaným posunům. Následná naměřená data, jsem získal v textovém formátu v podobě bodů definovaných v kartézském souřadném systému. K těmto datům byl vyhotoven program pro jejich zpracování, kde jsem následně vypočetl zadané tolerance a délkové rozměry součásti. Odkud byli tyto výsledky následně porovnány s údaji na výkresu a vytvořen měřicí protokol.

Práce svůj cíl splnila a výsledkem je vyhodnocení změřených bodů v kartézských souřadnicích. Kde naměřená data jsou zpracována pro určení předepsaných rozměrů a tolerancí zadaných ve výkresové dokumentaci. Z výsledků je patrné, že vybraná součást splňuje požadavky dle výkresové dokumentace jen pro určité rozměry a tolerance. V oblasti rovinnosti ploch je pouze jedna plocha, která nemá svou rovinnost v tolerančním pásmu. Jedná se o plochu, která se dá broušením opravit, tak dosáhnout požadované toleranční hodnoty. Pro vyhodnocení válcovitosti otvorů pro hřídel je patrné, že otvor D47 vyhověl, zatímco D28 nevyhověl. Je to dáno špatným obrobením díry. Jelikož otvor D28 disponuje velkou chybou tvaru a v jednom místě není obroben vůbec. Otvory pro uložení ložisek vyhověly pouze z jedné čtvrtiny, zbylé tři čtvrtiny jsou menší než požadovaný nejmenší tolerovaný průměr, lze je opravit vybroušením na požadovanou spodní mez tolerance. Poloha závitů vykazuje velkou chybu polohy, kde nejspíše špatným zvolením dělicí roviny při výrobě došlo k posunutí předepsané polohy závitových děr. Střední průměr závitů odpovídá předepsané hodnotě pouze v jedno případě, ostatní jsou mimo toleranční pásmo, což je dáno častým používáním závitových děr. Závitové díry byli jednou repasovány závitníkem, což také přispělo k jejich opotřebení. Montážní otvory D12 jsou vrtány s velkou nepřesností, jelikož na tyto tvary není požadována geometrická tolerance, jedná o otvory sloužící pro upevnění k tělu stroje.

Práce může posloužit, jako náhrada již vyvinutých softwarů pro 3D kontaktní měření. V případě realizace nabídne přehled možných technologií použitých v oblasti kontaktního souřadnicového měření.

23 Citovaná literatura

- [1] P. POKORNÝ, Souřadnicové měřicí stroje, Liberec: Technická univerzita, 1999.
- [2] F. K. J. Raja V., Reverse engineering: an industrial perspective. Springer series in advanced manufacturing, 2008.
- [3] L. Mařák, Metodika měření na souřadnicovém stroji a její vliv na výsledky měření, Plzeň, 2016.
- [4] C. doc. Ing. Vratislav Šulc, Technologie přístrojové techniky, Praha: Praha: ČVUT, Fakulta strojní, 1990.
- [5] P. Ing. Lenka Petřkovská, Souřadnicové měřicí stroje, Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013.
- [6] L. P. Lenka Čepová, „Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch,“ VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, Ostrava, 2011.
- [7] D. J. Heidenhain, „Heidenhain,“ 06 2019. [Online]. Available: https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/1113984-C2_Dotykové_sondy_cs.pdf. [Přístup získán 10 Červenec 2021].
- [8] B. J. Kohút, Použití měřících sond pro stroje z produkce TOS Kuřim, Brno, 2011.
- [9] J. Hrabal, Rešerše měřících systémů a metod automatické kontroly obrobků u obráběcích center, BRNO, 2009.
- [10] C. d. I. Z. Pustka, Základy konstruování, Liberec: Technická univerzita Liberec- Fakulta Strojní, 2009.
- [11] I. Linkeová, Základy počítačového modelování křivek a ploch, Praha: Skriptum ČVUT, 2008.
- [12] B. J. Fúsek, „vut.cz,“ 2018. [Online]. Available: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=174225. [Přístup získán 4 Srpen 2021].
- [13] J. Hrabal, „core.ac.uk,“ 2009. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/30291193.pdf>. [Přístup získán 10 Duben 2021].
- [14] I. L. Čavela, „AUTOMA časopis pro automatizační techniku,“ Automa – časopis pro automatizační techniku, s. r. o., [Online]. Available: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/vymena-dat-mezi-ruznymi-systemy-cad-2001_01_33435_2321/. [Přístup získán 23 Červen 2021].
- [15] N. Chernov, „Fitting geometric curves to observed data,“ [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.117.3465&rep=rep1&type=pdf>. [Přístup získán 15 Prosinec 2021].
- [16] Renishaw, „Renishaw apply innovation,“ [Online]. Available: <https://www.renishaw.cz/cs/materialy-doteku--6423>. [Přístup získán 7 Červenec 2021].
- [17] „Souřadnicové měřicí stroje,“ [Online]. Available: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>. [Přístup získán 14 DUBEN 2021].
- [18] BÍLÝ, Martin. Vliv filtrace a metody výpočtu na výsledek měření rozměrů a chyby tvaru při měření kruhovitosti. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [19] L. Č. Lenka Petřkovská, projekty fs vsb, Ostrava: Fakulta strojní VŠB-TUO, 2012.
- [20] „Matematika polopatě,“ [Online]. Available: <https://www.matweb.cz> [Přístup získán 18 BŘEZEN 2021].

24 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-Typy souřadnicových měřících strojů a) stojanový typ, b) výložníkový typ, c) portálový typ, d) mostový typ [6]	12
Obrázek 2-mechanismu kinematické sondy [9]	13
Obrázek 3-Princip měření kinematické sondy [6]	14
Obrázek 4-Mechanismus tenzorové sondy [9].....	14
Obrázek 5-Přenos signálu pomocí vodiče.....	15
Obrázek 6- Konstrukce sondy třídy 2xx, 44x, 64x [9].....	16
Obrázek 7- Sonda třídy TS740 [9].....	17
Obrázek 8- a) Přímý dotyk, b) Diskový dotyk, c) hvězdicový dotyk, d) Dotyk s hrotem, e) Válcový dotyk [11]	18
Obrázek 9- Materiály kuliček (rubín, nitrid křemíku, zirkonium) [11]	19
Obrázek 10- Rozměry dotyku [6]	20
Obrázek 11- Měřící systémy a) závitový hřídel b) indukční c) inkrementální délková stupnice d) laserinterferometr [6].....	22
Obrázek 12- Chyby vzniklé při měření [17]	24
Obrázek 14- Kosinová chyba	31
Obrázek 15- Kontakt sondy [3].....	32
Obrázek 16- Pojmenování bodů doteku [3]	32
Obrázek 23- Zarovnání mračen bodů [2]	43
Obrázek 24- Princip algoritmu ICP pro zarovnání mračen bodů [2].....	44
Obrázek 25-Tolerance přímosti [18].....	45
Obrázek 26- tolerance rovinnosti [18]	45
Obrázek 27- tolerance kruhovitosti [18]	46
Obrázek 28- tolerance válcovitosti [18].....	46
Obrázek 29- tolerance tvaru profilu [18]	46
Obrázek 30- tolerance tvaru plochy [18]	47
Obrázek 31- tolerance rovnoběžnosti [18].....	47
Obrázek 32- tolerance kolmosti [18].....	48
Obrázek 33- tolerance sklonu [18].....	48
Obrázek 34- tolerance umístění [18].....	49
Obrázek 35- tolerance sousostí a soustřednosti [18].....	49
Obrázek 36- tolerance souměrnosti [18].....	50
Obrázek 37- tolerance radiálního házení [18].....	50
Obrázek 38- tolerance axiálního házení [18]	51
Obrázek 39- tolerance celkového obvodového házení [18].....	51
Obrázek 40- tolerance celkového čelního házení [18].....	52
Obrázek 41- Měřená součást	54
Obrázek 42- Kalibrace doteku	56
Obrázek 43- Měření součásti	56
Obrázek 46 – dokumentace tolerance rovinnosti	61
Obrázek 48 – dokumentace tolerance kruhovitosti vývrtnu	62
Obrázek 51 – dokumentace průměrů	64
Obrázek 53 – dokumentace tolerance válcovitosti.....	65
Obrázek 55- polohy závitů	66
Obrázek 57 - dokumentace vzdálenosti středových os základen	67
Obrázek 59- dokumentace tolerance sousostí vývrtnu.....	68

25 SEZNAM PŘÍLOH

VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE (*PŘÍLOHA 1*)

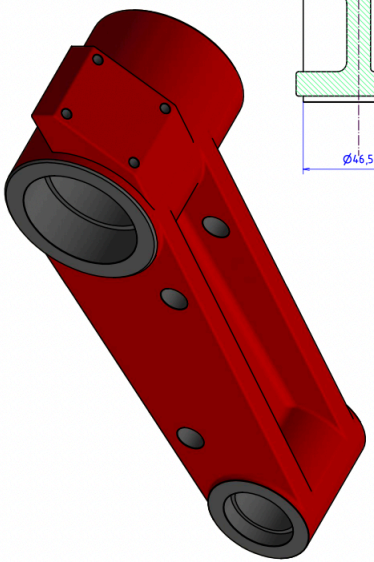
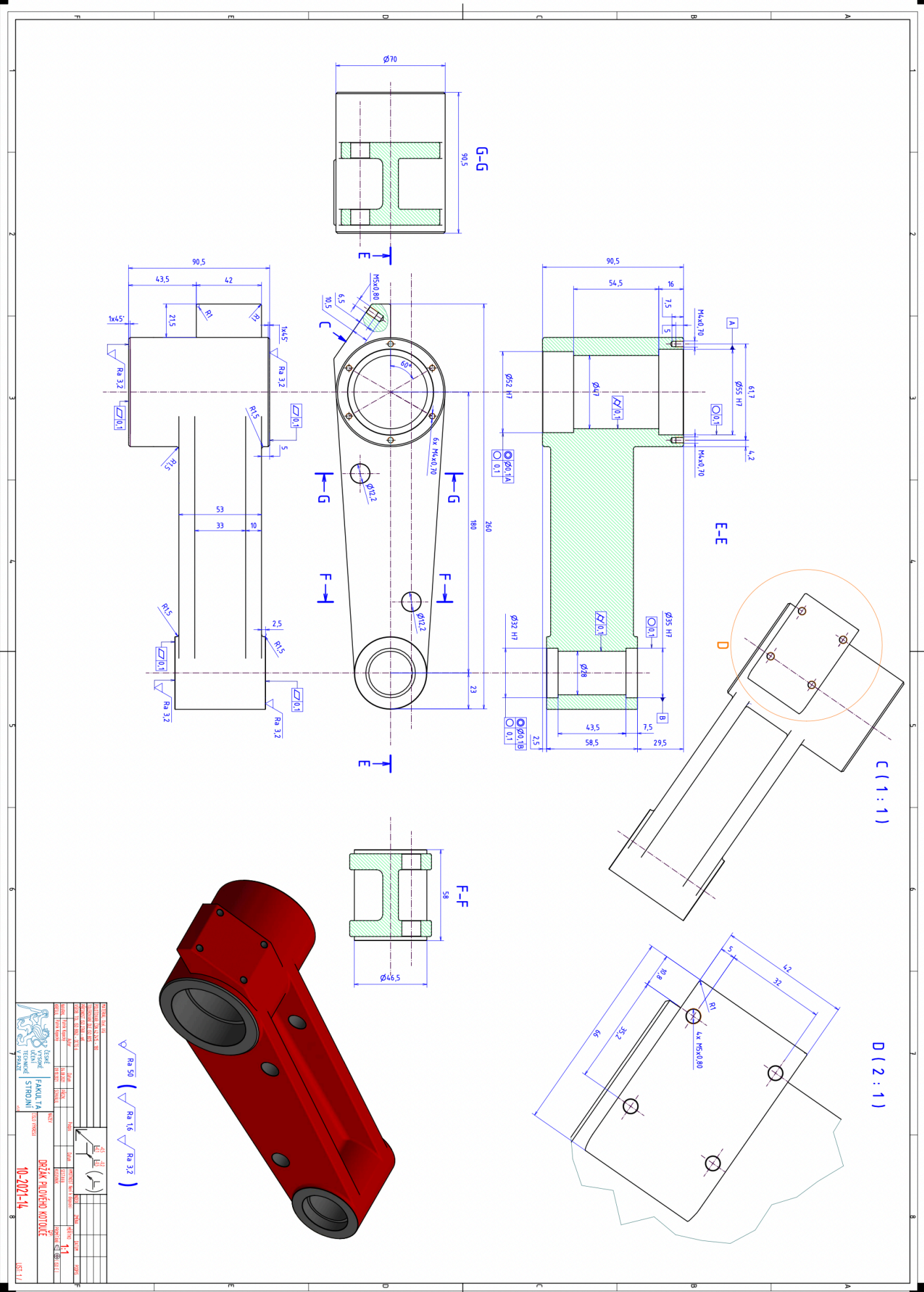
PROTOKOL MĚŘENÍ (*PŘÍLOHA 2-6*)

PŘEHLED POUŽITÝCH FUNKCÍ (*PŘÍLOHA 7*)

ZDROJOVÝ KÓD PROGRAMU (*ELEKTRONICKÁ PŘÍLOHA*)

KATALOGOVÝ LIST ZEISS PRISMO 7 (*ELEKTRONICKÁ PŘÍLOHA*)

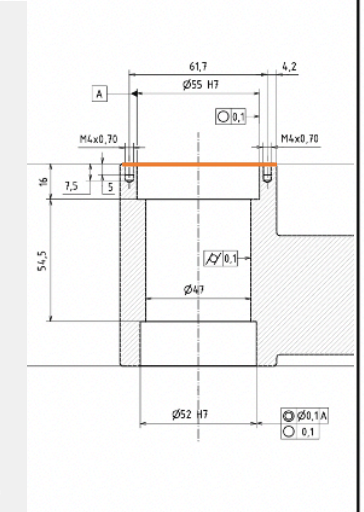
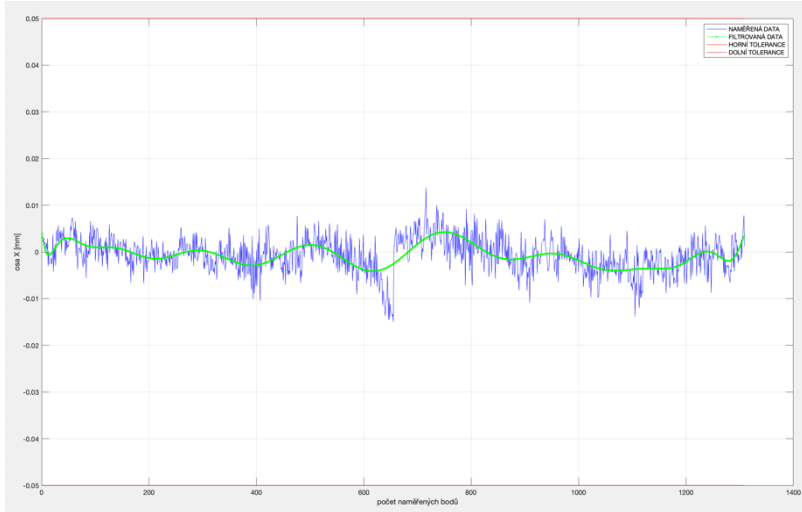
Priloha 1- Výkresová dokumentace měřené součásti



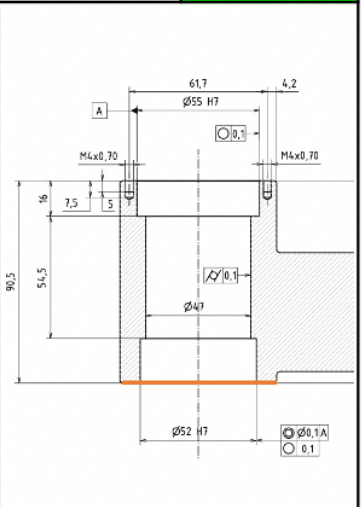
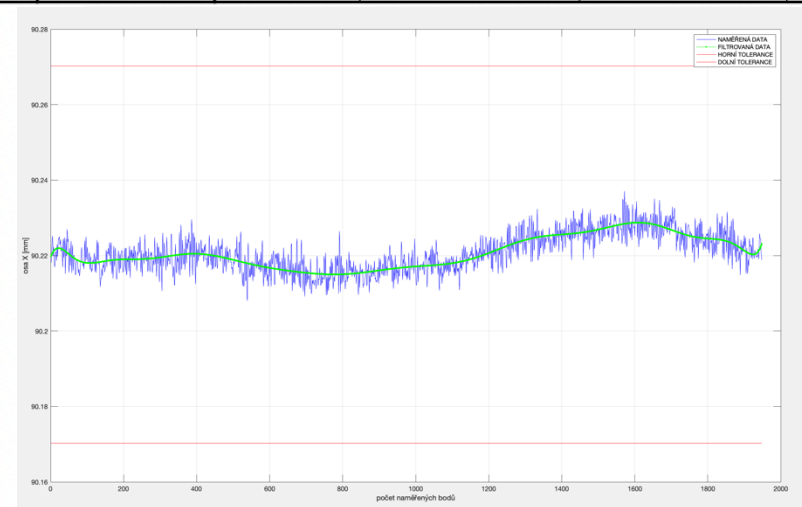
PROJEKTANT: M. KLAVAN	KONTROLA: M. KLAVAN
DESIGNER: M. KLAVAN	CHECKER: M. KLAVAN
DATE: 10.02.14	DATE: 10.02.14
STAV: Z	
MŠ: 11	
FAKULTA: STROJNÍ	
PRŮMYSLOVÉ VYSOKÉ ŠKOLE V BRNĚ	
10-2021-14	

Příloha 2- Vyhodnocení rovinnosti ploch

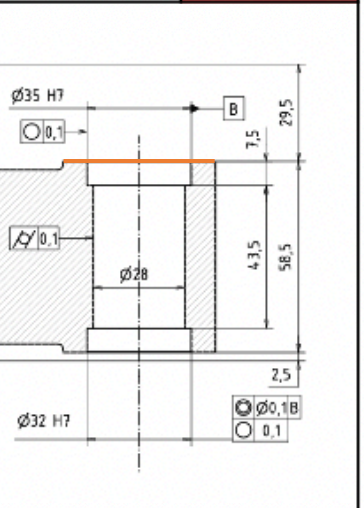
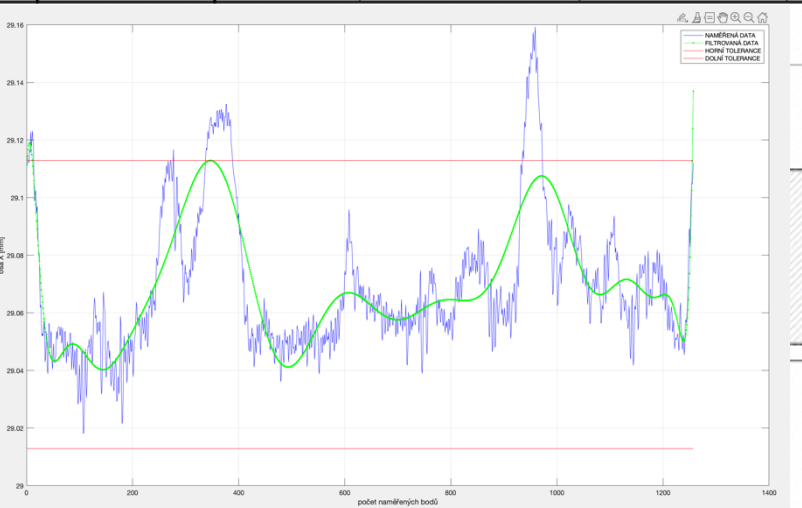
NÁZEV		HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
ROVINY						
ROVINA_X01		0.028673700	0	0.1	0	0.02867370
POLOHA_X01		-0.00062570	0.00000000	0.3	-0.3	-0.00062570



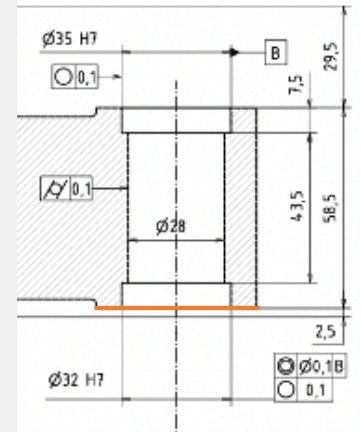
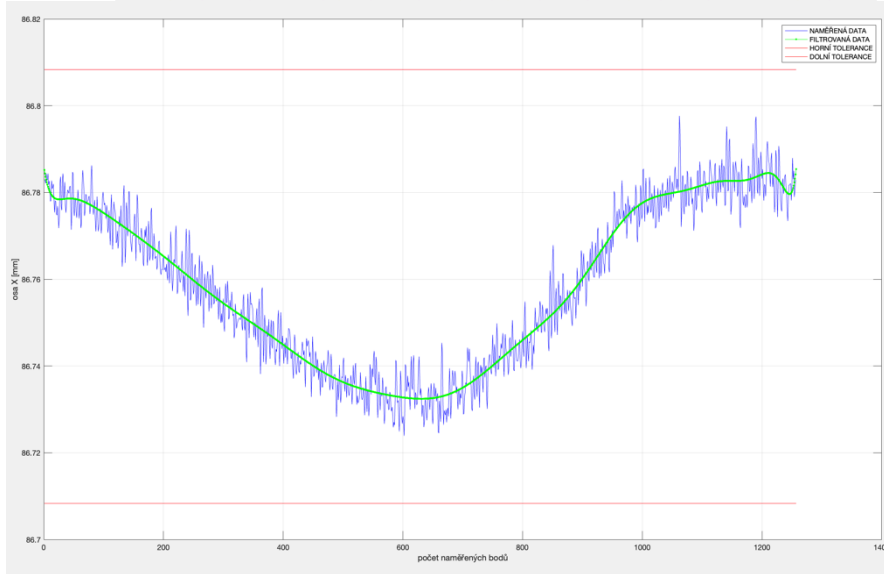
NÁZEV		HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
ROVINA_X905		0.02906760	0	0.1	0	0.02906760
POLOHA_X905		90.2202578	90.5000000	0.3	-0.3	-0.27974220



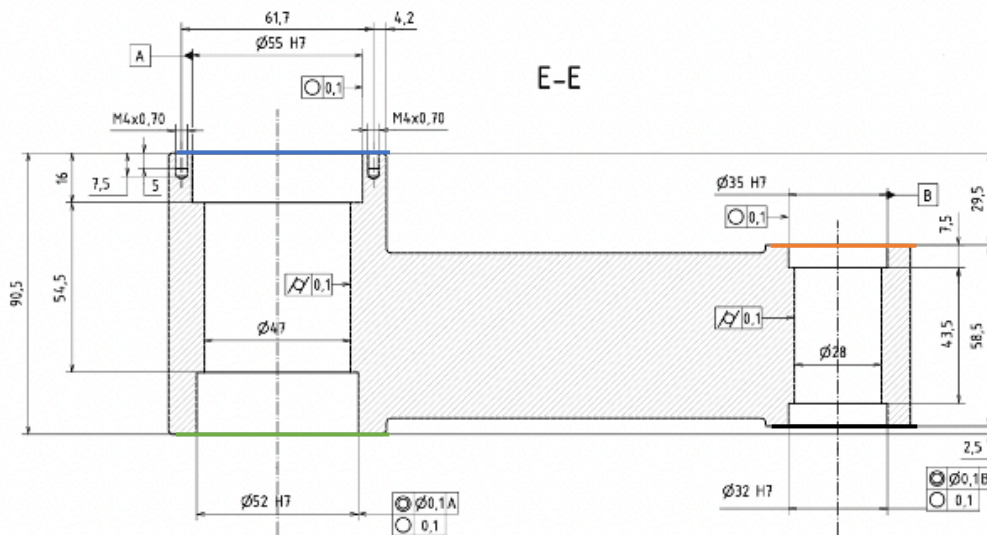
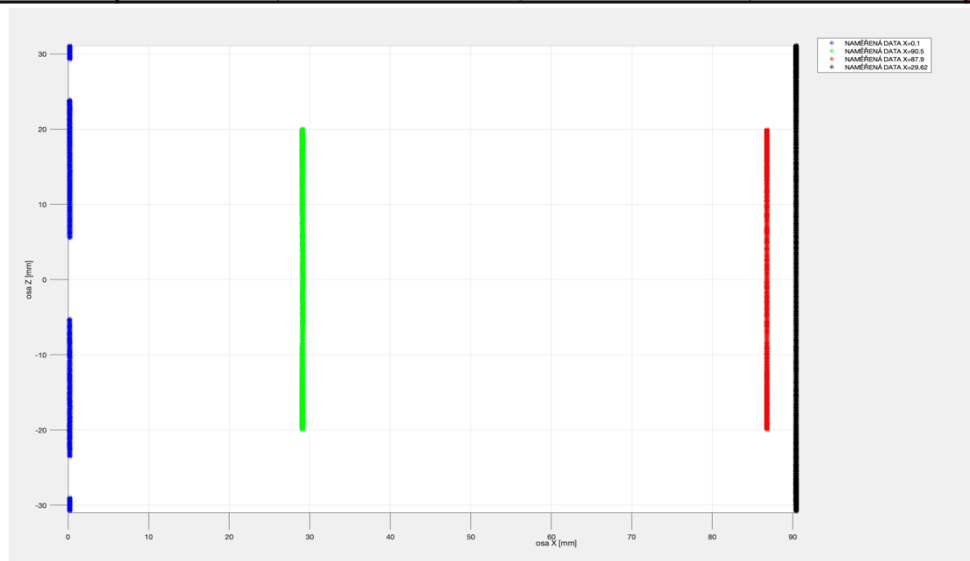
NÁZEV		HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
ROVINA_X2962		0.1412091	0	0.1	0	0.14120910
POLOHA_X2962		29.0629258	29.5000000	0.3	-0.3	-0.43707420



NÁZEV		HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
ROVINA_X879		0.0737502	0	0.1	0	0.07375020
POLOHA_X879		86.7583266	88.0000000	0.3	-0.3	-1.24167340

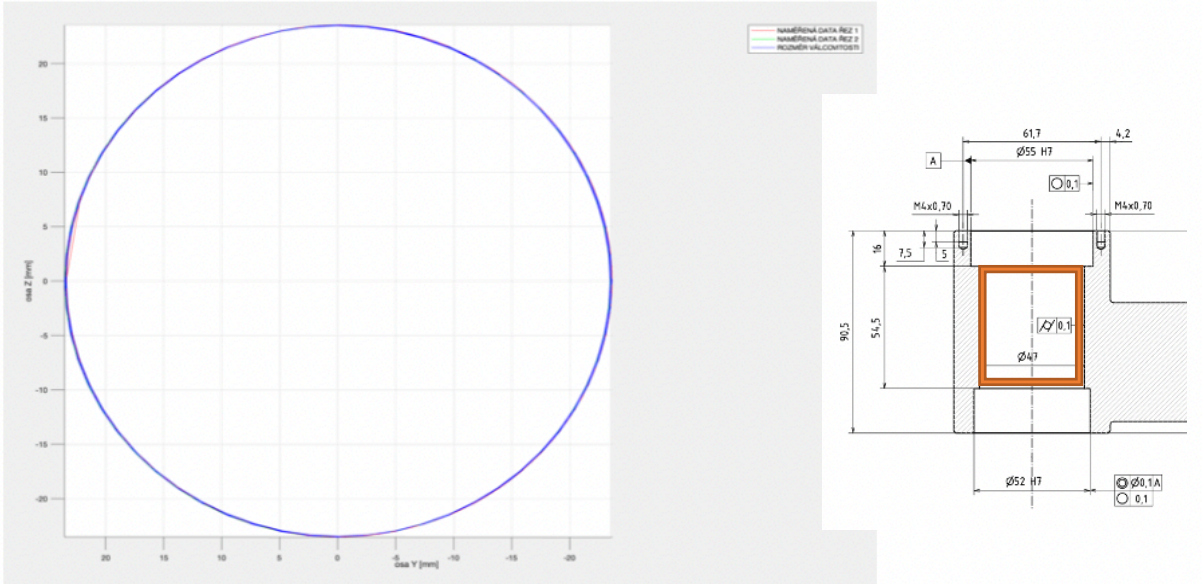


NÁZEV		HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
VZDÁLENOST ROVIN						
X01_TO_X905		90.22088350	90.5000000	0.3	-0.3	-0.27911650
X2962_TO_879		57.69540080	58.5000000	0.3	-0.3	-0.80459920

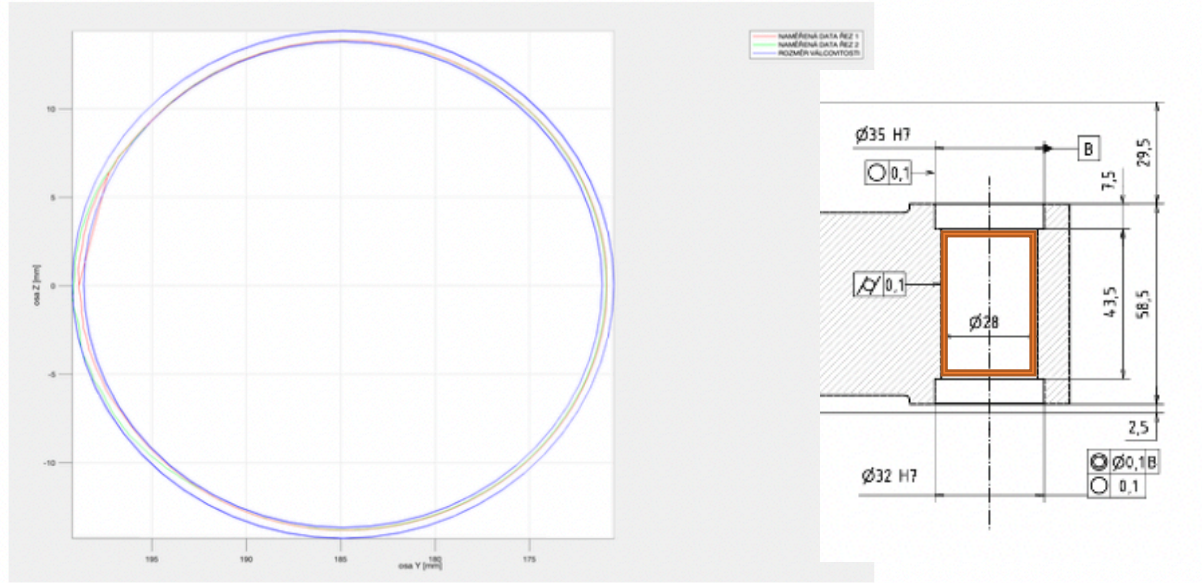


Příloha 3- Vyhodnocení sousostí, vzdáleností os vývrtů a válcovitostí otvorů pro hřídel

NÁZEV	HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
SOUOSOST ZÁKLADEN					
ZAK_C_TO_ZAK_D	0.000150913	0.00000000	0.1	0	0.00015091
ZAK_E_TO_ZAK_F	0.033359771	0.00000000	0.1	0	0.03335977
VZDÁLENOST OS ZÁKLADEN					
ZAK_C_TO_ZAK_E	186.556736219	180.0000000	0.3	-0.3	6.5567362
ZAK_D_TO_ZAK_F	184.7696392	180.0000000	0.3	-0.3	4.7696392
NÁZEV	HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
VÁLCOVITOST					
D47	0.050979277	0.00000000	0.1	0	0.050979277

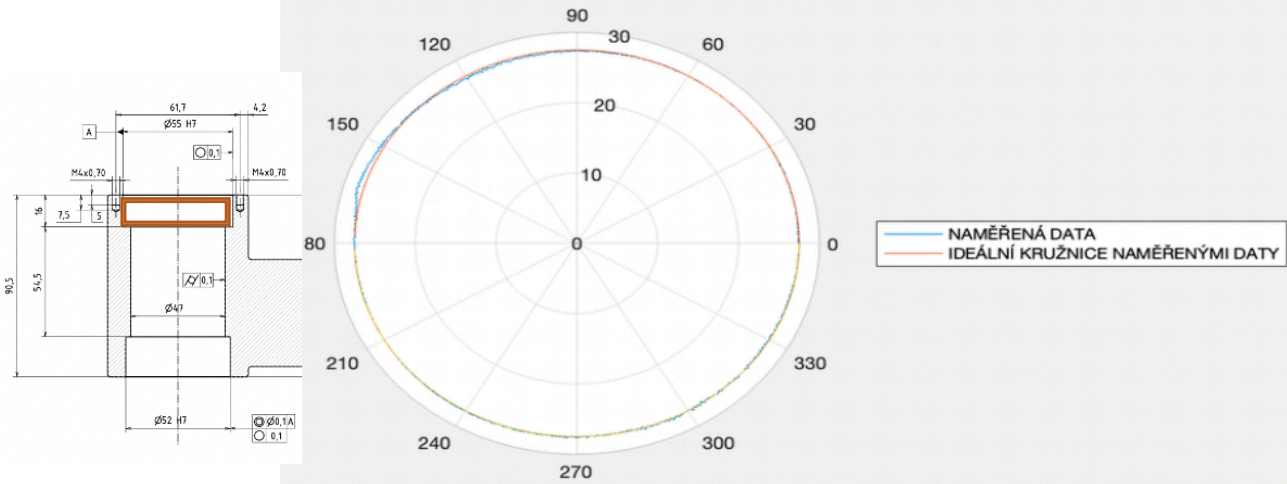


NÁZEV	HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
D28	0.61471792	0.00000000	0.1	0	0.61471792

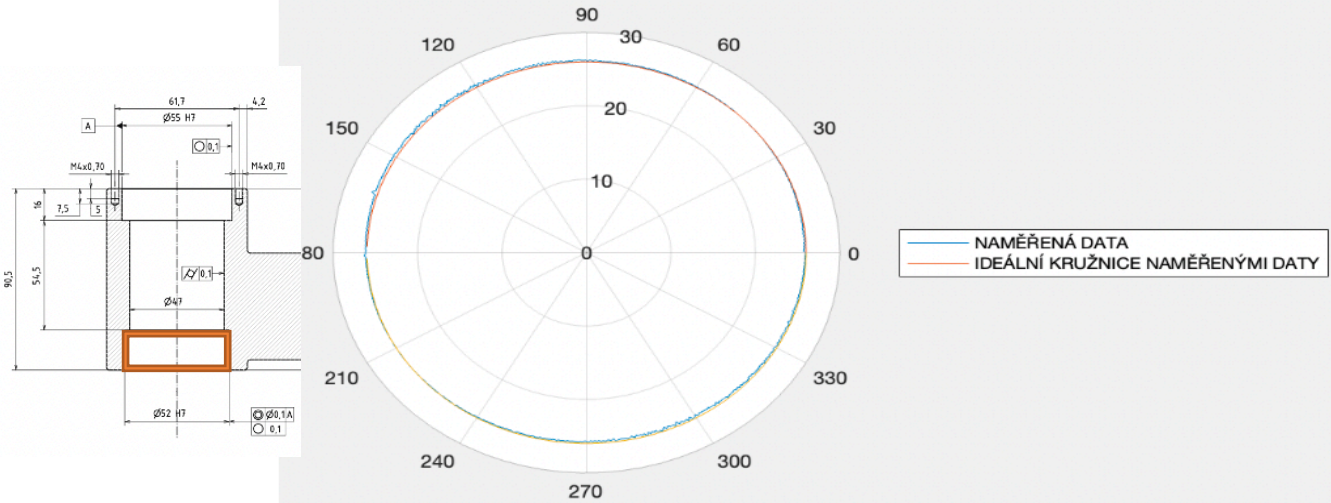


Příloha 4- Vyhodnocení děr pro ložiska

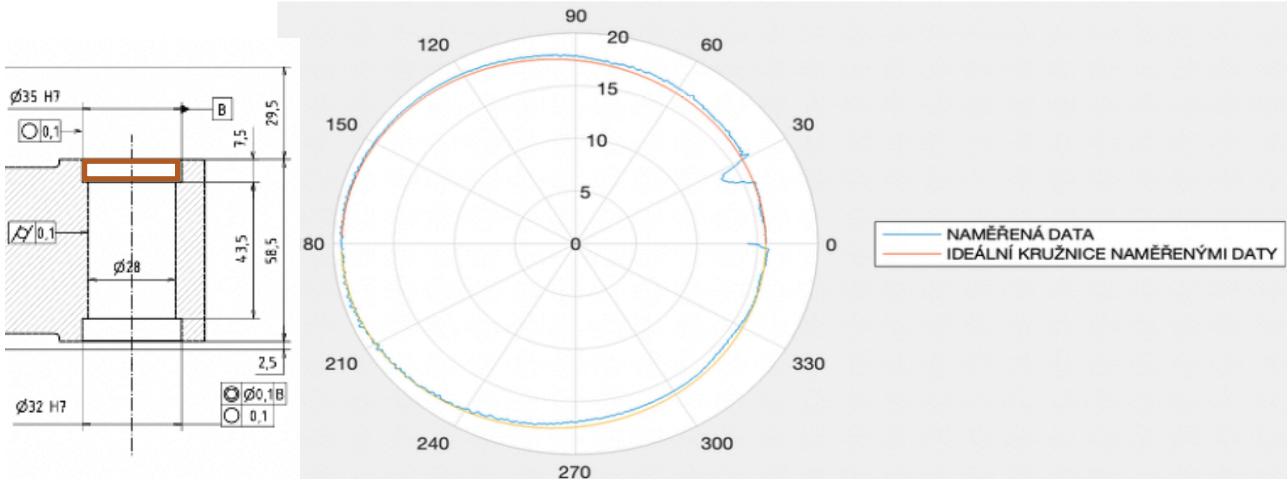
NÁZEV	HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
PRŮMĚR A KRUHOVITOST					
ZÁKLADNA_C_PRŮMĚR	55.00056590	55.00000000	0.03	0	0.00056590
ZÁKLADNA_C_KRUHOVITOST	0.047473351	0	0.1	0	0.047473351



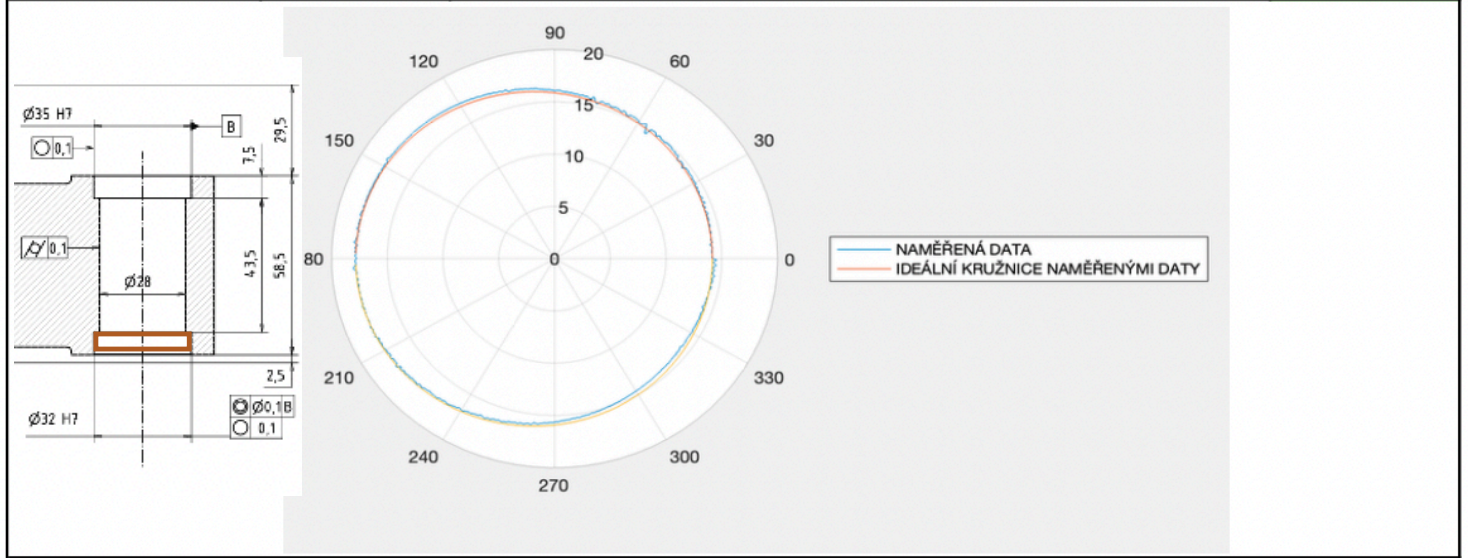
NÁZEV	HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
PRŮMĚR A KRUHOVITOST					
ZÁKLADNA_D_PRŮMĚR	51.98518649	52.00000000	0.03	0	-0.01481351
ZÁKLADNA_D_KRUHOVITOST	0.026185508	0	0.1	0	0.026185508



NÁZEV	HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
PRŮMĚR A KRUHOVITOST					
ZÁKLADNA_E_PRŮMĚR	34.99896094	35.00000000	0.03	0	-0.00103906
ZÁKLADNA_E_KRUHOVITOST	0.087038865	0	0.1	0	0.087038865

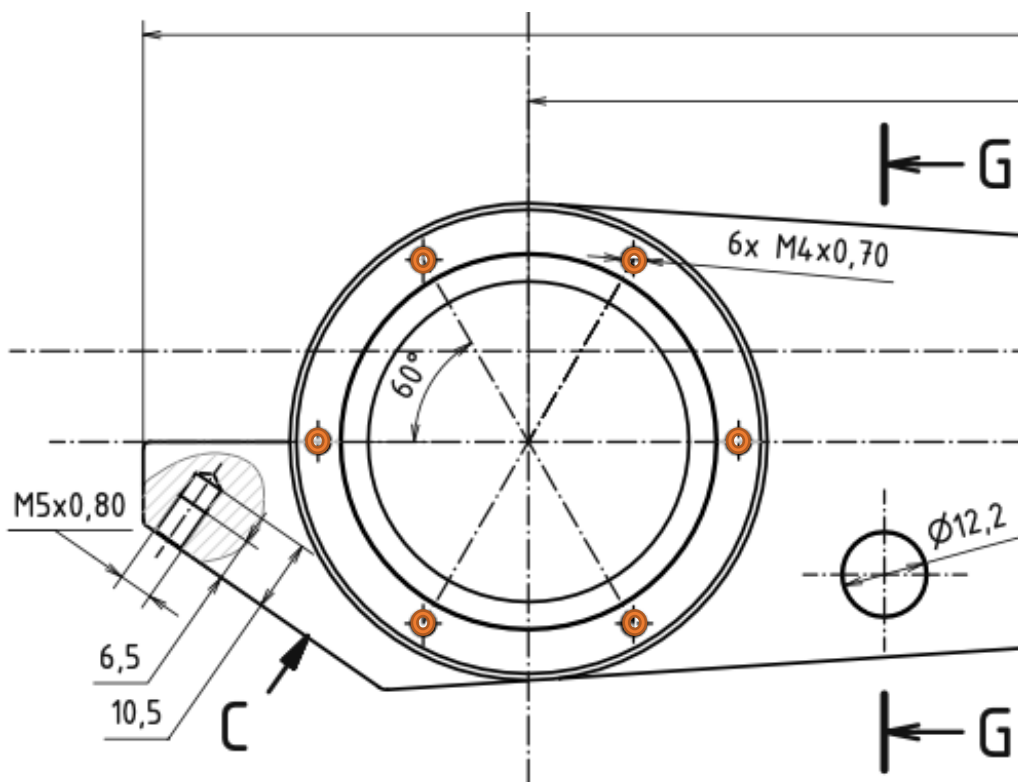
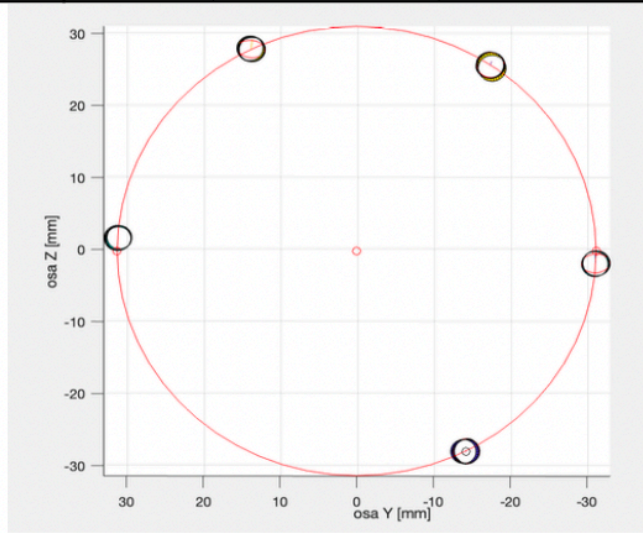


NÁZEV	HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
ZÁKLADNA_F_PRŮMĚR	31.99541295	32.00000000	0.03	0	-0.00458705
ZÁKLADNA_F_KRUHOVITOST	0.027832534	0	0.1	0	0.027832534



Příloha 5- Vyhodnocení polohy závitů a středního průměru

NÁZEV		HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
ZÁVITY M4x0.70 A POLOHA						
ZAVIT_M4_1		3.60416073	3.54500000	0.008	0	0.05916073
POLOHA_ZAVIT_M4_1		122.3804744	120	0.333	-0.333	2.380474378
ZAVIT_M4_2		3.624057125	3.54500000	0.008	0	0.079057125
POLOHA_ZAVIT_M4_2		183.0979356	180	0.333	-0.333	3.097935563
ZAVIT_M4_3		3.548833067	3.54500000	0.008	0	0.00383307
POLOHA_ZAVIT_M4_3		242.1573831	240	0.333	-0.333	2.157383136
ZAVIT_M4_4			3.54500000	0.008	0	
POLOHA_ZAVIT_M4_4			300	0.333	-0.333	
ZAVIT_M4_5		3.57634894	3.54500000	0.008	0	0.03134894
POLOHA_ZAVIT_M4_5		3.29764662	0	0.333	-0.333	3.29764662
ZAVIT_M4_6		3.58763253	3.54500000	0.008	0	0.04263253
POLOHA_ZAVIT_M4_6		63.33292826	60	0.333	-0.333	3.332928261



Příloha 6- Vyhodnocení děr pro montážní šrouby

NÁZEV		HODNOTA [mm]	NOMINÁLNÍ HODNOTA[mm]	HORNÍ TOLERANCE [mm]	DOLNÍ TOLERANCE [mm]	ODCHYLKA [mm]
DÍRY 12						
D_12_1		12.45220757	12.2000000			0.25220757
D_12_2		12.92112018	12.2000000			0.72112018
D_12_3		12.22551758	12.2000000			0.02551758
D_12_4						

PŘEHLED POUŽITÝCH FUNKCÍ

FITPLANE

Přizpůsobí rovinu mračnu bodů, které má maximální přípustnou vzdálenost od vnitřního bodu k rovině. Funkce vrací geometrický model, který popisuje rovinu. Tato funkce používá k nalezení roviny algoritmus M-estimator SAMple Consensus (MSAC).

FITCIRCLE

Přizpůsobí kruh sadě datových bodů v rovině, kde získáme střed kruhu (x,y) a poloměr kružnice R . Metoda využívá metody vyhodnocení podle Newton-Taubina.

POLYFIT

Tato funkce hledá koeficienty polynomu n -tého stupně, který odpovídá datům $p(x(i))$ až $y(i)$, pomocí metody nejmenších čtverců. Výsledkem pak je vektor délky $n+1$ obsahující polynomické koeficienty v sestupných mocninách.

Linspace

Funkce generuje lineárně rozložené vektory, kde poskytuje přímou kontrolu nad počtem bodů. Funkce generuje řádkový vektor, který má rozmístěný mezi hodnotami a a b , generuje počet bodů n v tomto rozsahu.

PCFITCYLINDER

Umístí válec do mračna bodů s maximální povolenou vzdáleností od vnitřního bodu. Tato funkce používá k nalezení válce algoritmus M-estimator SAMple Consensus (MSAC).

CART2POL

Transformuje trojrozměrné pole kartézských souřadnic na souřadnice cylindrické.

FOR CYKLUS

Tento cyklus používáme, když předem víme, kolikrát se mají provést určité příkazy. Počet opakování je většinou daný vektorem, ze kterého si v každé *iteraci* (tj. v každém průchodu cyklem) vezmeme jednu hodnotu - tato hodnota je uložena v tzv. *řídící proměnné cyklu*. V MATLABu je tento druh cyklu realizován příkazem `for`.

IF PODMÍNKA

Příkaz začíná klíčovým slovem *if*, za nímž následuje podmínka - to je libovolný výraz s logickou hodnotou 0 nebo 1 (většinou se v podmínkách používají relační nebo binární logické operátory). Uvnitř *if*u jsou jakékoli příkazy, které se mají provádět v případě splnění podmínky.